

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
MAMADOU BALDÉ

ÉTUDE D'UN COMPENSATEUR STATIQUE POUR ÉOLIENNES À VITESSE FIXE À
BASE DE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À CAGE

DECEMBRE 2010

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

L'une des causes principales de déconnexion des éoliennes du réseau est la variation de la tension (creux ou survoltage) au point de commun de connexion (PCC). L'utilisation d'un compensateur statique (STATCOM), permet de réguler cette tension et de maintenir les éoliennes connectées au réseau même sous certaines conditions de perturbation.

Dans ce travail, nous proposons un compensateur statique synchrone «STATCOM» multiniveaux à distribution du potentiel commun « Neutral Point Clamped » (NPC) permettant un apport de puissance réactive nécessaire au maintien de la tension au PCC d'une éolienne à vitesse fixe et du réseau. L'intérêt d'utiliser des convertisseurs à niveaux multiples réside dans leur capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité, une baisse de la fréquence de commutation, la réduction des pertes d'énergie et une diminution de l'effort des composants statiques. Aussi, l'utilisation d'un STATCOM multiniveaux diminue la taille des batteries.

Ce projet vise à étudier des structures d'onduleurs multiniveaux utilisées dans des applications de compensateur statique synchrone. Cette étude nous permettra de choisir entre la topologie d'onduleur multiniveaux NPC et celle cascade en pont H présentant les meilleures performances (compensation de puissance réactive, Ride Through, facilité de réalisation, etc.) pour fournir, à une charge ou à une éolienne à vitesse fixe connectée à un réseau local, les puissances active et réactive désirées pour le maintien d'une tension constante au PCC.

Nous commencerons par une recherche bibliographique sur les structures de STATCOM. Ensuite nous ferons une analyse théorique et comparative, des modélisations et des simulations de structures de convertisseurs NPC et cascade en pont H dans l'environnement Matlab/Simulink/SimpowerSystems. Aussi, sont présentés des analyses de transfert de puissance et un algorithme de compensation de la puissance réactive par un STATCOM NPC, pour une charge locale, puis pour une éolienne à vitesse fixe. Enfin, est réalisé des onduleurs NPC et cascade en pont H pour des validations expérimentales.

Remerciements

De prime abord, je remercie le Bon Dieu pour m'avoir donné la santé, le courage et la patience nécessaires pour l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude ainsi que toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire M. DOUMBIA Mamadou Lamine, qui m'a fait bénéficier de son savoir-faire, de ses conseils appréciables, de sa disponibilité, de son soutien financier et pour l'intérêt manifeste qu'il a porté à ce projet.

Je tiens aussi à exprimer mon respect et mes remerciements à mon codirecteur M. CHÉRITI Ahmed qui n'a épargné aucun moyen pour m'aider et soutenir, et aussi pour ses conseils précieux et ses directives pertinentes.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à tout le personnel du département du génie électrique de l'UQTR, merci aussi à la fondation de l'UQTR pour les précieuses bourses qu'elle m'a accordées.

Je tiens aussi à remercier M. BOULON Loïc et M. GHRIBI Mohsen d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Je tiens à travers ce mémoire, à exprimer mes sincères remerciements à CARDENAS Alben étudiant en doctorat et à YOUSIF Abdelrahman diplômé de la maîtrise en génie électrique à l'UQTR pour les discussions pertinentes et le temps précieux qu'ils ont bien voulu m'accorder.

Enfin, je remercie ma famille, qui m'a soutenu par leur amour et leur encouragement.

Dédicaces

À mon défunt père Alpha Oumar, celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes. Cher papa que la terre de la grande Guinée te soit légère et qu'Allah t'accueille dans ses paradis célestes.

À ma mère Hadja Mariama, celle qui attend avec patience les fruits de sa bonne éducation, pour tous les sacrifices qu'elle a consentis pour mon bien être et les conseils qu'elle m'a prodigué tout au long de mon éducation, chère maman que Dieu te procure santé et longévité.

À ma femme Binta, l'amour vieillit mais ne meurt jamais.

À maman Diariou Sow,

À mes frères et sœurs,

À mon oncle Alpha Oumar,

À toute ma famille,

Qui m'ont soutenu par leur amour et leurs efforts, et qui m'ont toujours encouragé. Qu'ils trouvent ici l'hommage de ma gratitude qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera à la hauteur de leurs sacrifices et leurs prières pour moi.

À mes ami(e) s et compagnons de classe, je leur dédie ce travail, expression de mon grand amour avec tous mes vœux de bonheur et de prospérité.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin,

À toutes les personnes qui méritent d'être citées dans ce mémoire,

Je leur dédie ce travail, expression de ma reconnaissance pour leur soutien.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	ii
Dédicaces	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	x
Liste des symboles	xvi
Liste des symboles	xvi
Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Objectifs du travail de recherche	5
1.2 Méthodologie de recherche	5
1.3 Organisation du mémoire	6
Chapitre 2 - Études théorique et comparative des différentes topologies de STATCOMS	7
2.1 Onduleur à trois niveaux de tensions de type NPC	9
2.1.1 Structure	9

2.1.2	Principe de fonctionnement	10
2.2	Onduleur à cinq niveaux de type NPC	12
2.2.1	Structure.....	12
2.2.2	Principe de fonctionnement	13
2.3	Généralisation de la structure NPC à N niveaux de tension.....	16
2.3.1	Structure :.....	16
2.3.2	Principe de fonctionnement :	17
2.4	Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont H.....	17
2.4.1	Structure.....	17
2.4.2	Principe de fonctionnement	18
2.5	Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont H.....	20
2.5.1	Structure.....	20
2.5.2	Principe de fonctionnement	21
2.6	Généralisation de la structure cascade en pont H à N niveaux de tension.....	24
2.6.1	Structure.....	24
2.6.2	Principe de fonctionnement	25
2.7	Technique de commande des convertisseurs multiniveaux.....	26
2.7.1	Modulation de largeur d'impulsion (MLI)	26

2.8 Conclusion.....	29
Chapitre 3 - Modélisation et Simulation des structures STATCOMS NPC et	
cascade en pont H	30
3.1 Développement d'un modèle de simulation Triphasé	30
3.1.1 Modèle d'onduleur NPC à trois niveaux développé.....	30
3.1.2 Modèle d'onduleur cascade en pont H à trois niveaux développé	32
3.1.3 Analyse Comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les deux modèles d'onduleur trois niveaux	33
3.1.4 Commande par SVPWM	37
3.2 Analyse comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les deux modèles d'onduleur de niveaux-5	38
3.2.1 Modèle Monophasé :.....	39
3.2.2 Modèle Triphasé	42
3.3 Génération des signaux de la commande.	45
3.3.1 NPC à trois niveaux	45
3.3.2 NPC à cinq niveaux	46
3.4 CONCLUSION	48
Chapitre 4 - Analyse du transfert de puissance du système : onduleur NPC trois	
niveaux, réseau électrique et charge	49

4.1	Analyse théorique de la compensation de la puissance réactive	49
4.1.1	Influence de V_{com} et de l'angle δ sur les puissances	51
4.1.2	Influence de l'inductance de couplage sur les puissances fournies par l'onduleur.....	54
4.1.3	Influence de V_{com} sur les puissances et la chute de tension au PCC	56
4.2	Choix de l'algorithme de commande de l'onduleur	59
4.2.1	L'algorithme de commande CCVSI	60
4.2.2	Simulation du système complet dans l'environnement Matlab Simulink /SimPowerSystems.....	62
4.3	Analyse des résultats de simulation d'un système STATCOM et éolienne à vitesse fixe.....	66
4.3.1	Modélisation et description du système	66
4.3.2	Analyse des résultats obtenus en simulation.....	69
4.4	Conclusion :.....	72
Chapitre 5 - Validation expérimentale		73
5.1	L'onduleur cascade en pont H monophasé à trois niveaux	73
5.1.1	Résultats expérimentaux pour l'onduleur cascade en pont H	76
5.2	L'onduleur NPC monophasé à trois niveaux.....	82
5.2.1	Résultats expérimentaux pour l'onduleur NPC	85

5.3 Conclusion :	90
Chapitre 6 - Conclusion générale.....	91
Références	93
Annexe A - Détails sur la programmation du Dspic	96
1. Code de génération des PWM	96
2. Schéma de câblage du Dspic	100
Annexe B - Photos des montages réalisés en laboratoire.....	101

Liste des tableaux

Tableau 2-1	Nombre de composants par topologie pour un convertisseur de N niveaux.	8
Tableau 2-2:	États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux	11
Tableau 2-3:	États possibles de l'onduleur NPC à 5 niveaux	15
Tableau 2-4:	États possibles de l'onduleur NPC à N niveaux	17
Tableau 2-5:	États possibles de l'onduleur Cascade à 3 niveaux.....	20
Tableau 2-6:	États possibles de l'onduleur cascade à 5 niveaux	23
Tableau 3-1:	Comparaison des résultats de simulation des deux modèles d'onduleur.....	32
Tableau 3-2:	Comparaison des résultats de simulation des deux types d'onduleurs	34
Tableau 3-3:	comparaison des méthodes de commandes SVPWM et MLI.....	38
Tableau 3-4:	Comparaison des résultats de simulation des deux types d'onduleur.....	39
Tableau 3-5:	Comparaison des résultats de simulation des deux modèles d'onduleur.....	42
Tableau 4-1:	Résultats de simulation de l'influence de V_{com} et de l'angle δ sur les puissances.....	53
Tableau 4-2:	Résultats de simulation de l'influence de l'inductance de couplage sur les puissances	55
Tableau 4-3:	Résultats de simulation de l'influence de V_{com} sur les puissances	59

Liste des figures

Figure 2.1	Topologies d'onduleur à 5 niveaux a) NPC; b) cascade en pont 'H'	8
Figure 2.2	Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux	9
Figure 2.3	Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux	10
Figure 2.4	Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux	11
Figure 2.5	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux	12
Figure 2.6	Schéma d'un onduleur NPC à 5 niveaux	13
Figure 2.7	NPC 5 niveaux : Principe de commutation a-) Génération de $V_{ao} = \frac{E}{2}$, b-) Génération de $V_{ao} = 0$, c-) Génération de $V_{ao} = -\frac{E}{4}$	14
Figure 2.8	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC 5niveaux	15
Figure 2.9	Bras d'onduleur NPC à N niveaux de tension	16
Figure 2.10	Schéma triphasé d'un onduleur cascade en pont H à 3 niveaux	18
Figure 2.11	Bras d'onduleur cascade en pont H à trois niveaux	18
Figure 2.12	Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en H	19
Figure 2.13	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H	20
Figure 2.14	Schéma d'un onduleur cascade en H à 5 niveaux	21
Figure 2.15	Pont H 5 niveaux : Principe et exemples de mécanisme de commutation a-) Génération de $V_{oa} = +E$, b-) Génération de $V_{oa} = 0$, c-) Génération de $V_{oa} = -2E$	22

Figure 2.16 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H 5niveaux	23
Figure 2.17 Schéma d'un onduleur cascade en pont H à N niveaux.....	25
Figure 2.18 Forme d'onde des signaux PD pour 5 Niveaux	27
Figure 2.19 Forme d'onde des signaux POD pour 5 Niveaux	27
Figure 2.20 Forme d'onde des signaux POD pour 5 Niveaux	28
Figure 2.21 Forme d'onde des signaux PS pour 5 Niveaux.....	28
Figure 3.1 Modèle développé d'onduleur NPC à trois niveaux.....	30
Figure 3.2 : Schéma de simulation des deux modèles	31
Figure 3.3 : Modèle d'onduleur NPC à trois niveaux développé.....	33
Figure 3.4 : Forme des signaux de l'onduleur NPC trois niveaux	35
Figure 3.5 : Spectre harmonique du courant de charge NPC trois niveaux	35
Figure 3.6 : Spectre harmonique de la tension v_{ab} du NPC trois niveaux.....	35
Figure 3.7 : Spectre harmonique de la tension v_{an} du NPC trois niveaux	35
Figure 3.8 : Forme des signaux de l'onduleur cascade en pont H trois niveaux.....	36
Figure 3.9 : Spectre harmonique du courant de charge de cascade en pont H trois niveaux	36
Figure 3.10 : Spectre harmonique de la tension v_{ab} de cascade en pont H trois niveaux	37
Figure 3.11 : Spectre harmonique du la tension v_{an} de cascade en pont H trois niveaux	37
Figure 3.12 : Forme des signaux de l'onduleur NPC cinq niveaux	40
Figure 3.13 : Spectre harmonique du courant I_a	40
Figure 3.14 : Spectre harmonique du la tension v_{an} de l'onduleur NPC cinq niveaux	40
Figure 3.15 : Forme des signaux de l'onduleur cascade cinq niveaux.....	41
Figure 3.16 : Spectre harmonique du courant I_a de l'onduleur cascade cinq niveaux	41

Figure 3.17 : Spectre harmonique du la tension v_{an} de l'onduleur cascade cinq niveaux	41
Figure 3.18 : Forme des signaux de l'onduleur triphasé NPC cinq niveaux.....	43
Figure 3.19 : Spectre harmonique du la tension v_{ab} l'onduleur triphasé NPC cinq niveaux.....	43
Figure 3.20 : Spectre harmonique du courant I_a l'onduleur triphasé NPC cinq niveaux	43
Figure 3.21 : Forme des signaux de l'onduleur cascade triphasé cinq niveaux.....	44
Figure 3.22 : Spectre harmonique du la tension v_{ab} de l'onduleur cascade triphasé cinq niveaux.....	44
Figure 3.23 : Spectre harmonique du courant de charge de l'onduleur cascade triphasé cinq niveaux.....	45
Figure 3.24 : Génération des Signaux MLI d'un onduleur NPC à trois Niveaux.....	46
Figure 3.25 : Signaux de commande MLI d'un onduleur NPC à trois Niveaux.....	46
Figure 3.26 : Génération des Signaux MLI d'un onduleur cascade en pont H cinq niveaux.....	47
Figure 3.27 : Signaux de commande MLI d'un onduleur cascade en pont H cinq niveaux.....	47
Figure 4.1 : Diagramme équivalent du système de compensation de puissance réactive [16].....	49
Figure 4.2 : Schéma du modèle de simulation dans Simulink/SimPowerSystems	51
Figure 4.3 : Schéma du modèle de simulation dans Simulink/SimPowerSystems	54
Figure 4.4 : Schéma du modèle de simulation dans Simulink/SimPowerSystems	57
Figure 4.5 : Évolution des puissances actives et réactives du système cas 1	57
Figure 4.6 : Évolution des puissances actives et réactives du système cas 2.....	58
Figure 4.7 : Évolution des puissances actives et réactives du système cas 3.....	58
Figure 4.8 : Diagramme de la commande de courant	62

Figure 4.9 : Schéma synoptique du système STATCOM-Charge-Réseau	62
Figure 4.10 : Schéma de simulation du système	63
Figure 4.11 : Graphiques transfert de puissance sans STATCOM	64
Figure 4.12 : Graphiques transfert de puissance avec STATCOM	65
Figure 4.13 : Graphiques a) de courants de références	65
Figure 4.14 : Graphiques des courants générés par l'onduleur	65
Figure 4.15 : Schéma de simulation du système parc éolien et STATCOM	66
Figure 4.16 : Schéma bloc du STATCOM utilisé	67
Figure 4.17 : Modèle développé du parc éolien	68
Figure 4.18 : Modèle développé d'une éolienne	68
Figure 4.19 : vitesse des génératrices et angles de calage des pales des éoliennes	69
Figure 4.20 : Puissances réactives et actives et vitesses du vent	70
Figure 4.21 : Tension au point de connexion commun VB25	70
Figure 4.22 : Puissance réactive fournie par le STATCOM et tension VB25	71
Figure 4.23 : Tension au point commun de connexion VB25	71
Figure 4.24 : Puissances réactives et actives et vitesses du vent	72
Figure 5.1 : Photo de l'onduleur Miniskip8 triphasé de SEMIKRON	74
Figure 5.2 : Topologie d'un onduleur triphasé à deux niveaux	74
Figure 5.3 : Signaux PWM obtenus par le Dspic	74
Figure 5.4 : Interface circuit PWM pour l'onduleur cascade en pont H	75
Figure 5.5 : Système global pour la validation de l'onduleur cascade en pont H	76
Figure 5.6 Signaux PWM obtenus après amplification	76
Figure 5.7 : Forme d'onde de la tension de charge expérimentale pour le pont H	77
Figure 5.8 : Schéma réalisé avec charge résistive $R = 60\Omega$ pour le pont H	77

Figure 5.9 : Forme d'onde de la tension et du courant de charge expérimentaux pour le pont H.....	78
Figure 5.10 : Forme d'onde de la tension et du courant de charge simulés pour le pont H	78
Figure 5.11:Schéma réalisé avec charge $R = 60\Omega$ et $L = 80mH$ pour le pont H.....	79
Figure 5.12 : Forme d'onde tension et courant de charge expérimentaux pour le pont H.....	79
Figure 5.13 : Forme d'onde tension et courant de charge simulés pour le pont H	79
Figure 5.14 : Schéma réalisé avec charge $R = 60\Omega$ avec filtre pour le pont H	80
Figure 5.15 : Forme d'onde tension de sortie de l'onduleur et du courant de charge expérimentaux pour le pont H	80
Figure 5.16 : Forme d'onde tension et courant de charge simulés pour le pont H	81
Figure 5.17 : Forme d'onde tension et courant de charge expérimentaux pour le pont H.....	81
Figure 5.18 : Forme d'onde tension et courant de charge simulés pour le pont H	81
Figure 5.19 : Photo de l'onduleur NPC.....	82
Figure 5.20 : Signaux PWM obtenus par le Dspic.....	83
Figure 5.21 : Circuit de câblage de l'interface électronique pour le NPC	84
Figure 5.22: Système global pour la validation de l'onduleur NPC	85
Figure 5.23 : Signaux PWM obtenus après amplification	85
Figure 5.24 : Schéma réalisé du NPC à vide.....	86
Figure 5.25 : Forme d'onde de la tension de sortie expérimentale à vide pour le NPC	86
Figure 5.26 : Forme d'onde de la tension de sortie simulée à vide pour le NPC.....	86
Figure 5.27 : Schéma réalisé du NPC avec charge $R = 240\Omega$	87
Figure 5.28 : Forme d'onde de la tension de charge expérimentale pour le NPC	88
Figure 5.29 : Forme d'onde de la tension de charge simulée pour le NPC.....	88

Figure 5.30 : Schéma réalisé du NPC avec charge $R = 240\Omega$ et avec filtre	89
Figure 5.31 : Forme d'onde de la tension de charge expérimentale pour le NPC	89
Figure 5.32 : Forme d'onde de la tension de charge simulée pour le NPC.....	89
Figure A.1 Organigramme du code utilisé.....	98
Figure A.2 Circuit du Dspic dans MPLAB.....	99
Figure A.3 Circuit de câblage du dsPic	100
Figure B.1 Système global pour la validation de l'onduleur cascade en pont H	101
Figure B.2 Système global pour la validation de l'onduleur NPC	101
Figure B.3 : Photo de l'interface circuit de commande pour le NPC	101

Liste des symboles

Symbole	Description	Unité
PCC	Point commun de connexion	
C	Capacité du bus cc	(F)
E	Tension d'entrée de l'onduleur	(V)
K_i	L'interrupteur (IGBT) d'indice i de l'onduleur	
I	Courant de ligne	(A)
I_{ch}	Courant de charge	(A)
R	Résistance de la charge	(Ω)
L	Inductance de la charge	(H)
P	Puissance active	(W)
Q	Puissance réactive	(var)
S	Puissance apparente	(VA)
$V_{rés}$	Tension du réseau	(V)
V_{com}	Tension de sortie de l'onduleur	(V)
Z_L	Impédance de ligne (regroupe les impédances des deux sources)	(Ω)
R_L	Résistance de ligne (regroupe les résistances des deux sources)	(Ω)
X_L	Réactance de ligne (regroupe les réactances des deux sources)	(Ω)
δ	Angle de charge	(degrés)

V_{ao}	Tension entre le point a et le point o	(V)
V_{ab}	Tension entre la phase a et la phase b	(V)
m_a	Indice de modulation en amplitude	(sans unité)
m_f	Indice de modulation en fréquence	(sans unité)
A_r	Amplitude du signal de référence	(V)
f_r	Fréquence du signal de référence	(Hz)
A_c	Amplitude de la porteuse	(V)
f_c	Fréquence de la porteuse	(Hz)
TDH	Taux de distorsion harmonique	(sans unité)
D_i	Diode d'indice i de l'onduleur	

Chapitre 1 - Introduction

Ces dernières années, la production des énergies renouvelables, particulièrement celle produite à l'aide des éoliennes, prend une place de plus en plus importante dans l'énergie totale fournie aux consommateurs par les compagnies d'électricité. La puissance installée a pris une proportion telle que les gestionnaires des réseaux électriques imposent de nouvelles normes pour la déconnexion des unités décentralisées de production d'énergie électrique. En effet, les déconnexions suite aux déclenchements d'équipements de protection des parcs éoliens, ne sont plus tolérées selon certaines normes [1]. Pour maintenir les éoliennes connectées au réseau même sous certaines conditions de perturbation, les concepteurs et les constructeurs sont obligés de créer de nouveaux systèmes de commande permettant de garder les éoliennes en production sur le réseau électrique. Cette capacité des éoliennes à se maintenir sur le réseau est appelée « Ride Through » dans la littérature [2, 3, 4]. Dans le cas d'éoliennes à vitesse fixe à base de génératrice à induction à rotor à cage (directement connectée au réseau), le contrôle des puissances à l'aide des courants rotoriques ou statoriques n'est pas possible. Ce type d'éolienne n'est pas relié à un convertisseur, ce qui simplifie sa structure et rend son coût moins élevé comparativement aux autres types d'éoliennes (éoliennes à vitesse variable utilisant une génératrice à induction à rotor bobiné ou une génératrice synchrone) [1]. Cependant, l'énergie réactive nécessaire pour magnétiser la machine, ne peut être produite par un convertisseur, d'où le recours à des bancs de condensateurs raccordés au point commun de connexion (PCC) avec le réseau électrique. Aussi, l'énergie réactive fournie par ces condensateurs est fixe et ne peut donc pas contribuer à réguler la tension au point de connexion [5]. L'une des causes principales de déconnexion des éoliennes du réseau est la variation de la tension (creux ou survolage) au PCC [1,4].

Des recherches antérieures et des expériences pratiques ont montré que les perturbations telles que la perte d'une paire de lignes de transmission, les courts-circuits,

engendrent des chutes de tension considérables au PCC qui conduisent à une déconnexion de l'éolienne du réseau [4]. En effet, la perte d'une ligne de transmission conduit à l'augmentation de la réactance équivalente de la ligne, qui implique une augmentation de la consommation de l'énergie réactive, donc un supplément de puissance réactive est nécessaire afin d'éviter des chutes de tension au PCC [4]. Dans le cas d'un court-circuit, le stator de la génératrice asynchrone à cage est démagnétisé en raison de la chute de tension au PCC tandis que la vitesse du rotor elle augmente. Étant donné que le flux du rotor ne peut pas changer immédiatement, la machine est en régime transitoire et injecte une grande quantité de puissance réactive dans le système. Après la faute, la machine consomme une grande quantité de puissance réactive en raison de la ré-magnétisation et de l'augmentation de vitesse du rotor au cours de la faute [4]. D'où la nécessité d'un compensateur de puissance réactive pour améliorer la capacité de l'éolienne à rester connectée au réseau malgré un défaut (Ride Through).

Ainsi, les variations de tension sont en partie induites par les transits de puissance réactive. C'est pourquoi, il est demandé aux éoliennes actuellement connectées au réseau de transport de participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive [1]. Ce réglage est possible avec les éoliennes connectées au réseau via de l'électronique de puissance [6], mais pas avec les éoliennes à vitesse fixe dont la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Cette dernière consommant une puissance réactive significative, nécessite l'ajout de condensateurs de compensation.

La compensation de la puissance réactive se fait par plusieurs méthodes traditionnelles et modernes. Dans notre cas, il s'agit de fournir au réseau la puissance réactive nécessaire pour le maintien de la tension au PCC au-dessus d'une certaine valeur permettant à l'éolienne de rester connectée au réseau malgré un défaut. La compensation de puissance réactive est définie comme la gestion de la puissance réactive pour améliorer le rendement du système électrique.

Les compensateurs de puissance réactive conventionnels sont :

- Batteries de condensateurs:

Traditionnellement, les bancs de condensateurs fixes ou à interrupteurs mécaniques (éléments passifs) sont utilisés pour compenser le courant réactif consommé par la charge.

En effet, le courant en avance tiré par les condensateurs shunt compense le courant en retard tiré par la charge. Cependant en cas de charges variables, le banc de condensateurs fixes a pour inconvénient de provoquer soit une sous-compensation soit une surcompensation [5]

- Compensateur synchrone:

Une autre méthode traditionnelle consiste à utiliser le compensateur synchrone. En effet, le compensateur synchrone a joué un rôle majeur dans le contrôle de tension et de puissance réactive pour plus d'un demi-siècle. Le compensateur synchrone est une machine synchrone tournant à vide dont la seule fonction est de consommer ou de fournir de la puissance réactive au réseau. C'est en ajustant le courant d'excitation qu'il est possible de fournir de l'énergie (machine surexcitée) ou d'en consommer (machine sous excitée). Ce genre de machine permet de fournir de l'énergie réactive lorsque le réseau est chargé, et d'absorber l'énergie réactive générée par les lignes lorsque la consommation est faible. Les compensateurs synchrones sont utilisés pour maintenir la tension du réseau de distribution et de transmission dans un intervalle désiré sous charges et conditions variables. Cependant, les compensateurs synchrones sont rarement utilisés de nos jours, car leur installation demande une fondation solide, une quantité d'énergie significative de démarrage et un équipement de protection. Ils contribuent aussi au courant de court circuit, et ils ne peuvent pas être contrôlés de façon rapide pour pouvoir s'adapter aux variations rapides des charges. En outre, leurs pertes et leur prix sont plus élevés comparativement aux compensateurs statiques [5].

- Compensateur statique à thyristors:

En cas de charges variables, les bancs de condensateurs fixes ont pour inconvénient de provoquer soit une sous-compensation soit une surcompensation. En utilisant des interrupteurs (relais, disjoncteurs) on peut brancher ou débrancher les condensateurs suivant la demande de puissance réactive des charges variables. Mais, cette méthode a pour inconvénient d'être lente et peu fiable. De même, elle génère des courants d'appel et a besoin d'une maintenance fréquente. Par ailleurs, les éléments passifs conduisent souvent à des résonances imprévisibles qui peuvent amplifier la distorsion [5,7, 8].

Les compensateurs statiques de puissance réactive « Static Var Compensator » (SVC), sont des compensateurs shunts de puissance réactive à base de thyristor. Ils ont un temps de réponse rapide comme avantage sur les compensateurs synchrones. Ils se divisent en deux groupes: les condensateurs commutés par thyristors, « Thyristor Switched Capacitor » (TSCs) et les inductances contrôlées par thyristors « Thyristors Controlled Reactor » (TCRs). Les TSCs ont comme avantage une absence de production d'harmoniques. Malgré leur simplicité, les TSCs sont moins populaires à cause des inconvénients suivants : la compensation de Var n'est pas continue, chaque banc de condensateurs ayant besoin de thyristors séparés rend la construction moins économique et enfin les thyristors doivent être dimensionnés pour des tensions élevées ou doivent être protégés par des circuits externes contre les tensions transitoires et les courants de défaut. Quant aux TCRs, ils sont caractérisés par une aptitude d'effectuer un contrôle continu et pratiquement une absence de transitoires.

Leurs principaux inconvénients sont la production de courants harmoniques de faible fréquence et les pertes élevées en absorbant de la puissance réactive [5, 7].

- Le compensateur statique synchrone (STATCOM) :

Avec le progrès remarquable des composants semi-conducteurs à commutation forcée, l'attention s'est concentrée sur les compensateurs de var auto commutés qui peuvent générer ou absorber de la puissance réactive sans demander un large banc de condensateurs ou d'inductances.

La technologie des convertisseurs à commutation forcée est utilisée pour implémenter des compensateurs de puissance réactive telle que le STATCOM « Static Synchronous Compensator » Le STATCOM est basé sur un semi-conducteur à source de tension implémentée avec un onduleur connecté en parallèle sur le réseau à travers une inductance de couplage.

Les principaux avantages des compensateurs de var à commutation forcée (méthodes plus récentes) sont leurs faibles dimensions, leur temps de réponse très rapide et leur coût faible grâce à l'élimination du grand nombre de composants passifs.

Cependant, les composants semi-conducteurs des convertisseurs à commutation forcée ne supportent pas de tension très élevée, surtout dans le cas des systèmes à très haute tension.

1.1 Objectifs du travail de recherche

L'objectif principal de ce travail de recherche est de contribuer au développement de solutions pour améliorer la capacité des éoliennes à vitesse fixe à rester connectée au réseau malgré un défaut «Ride Through» Nous proposons une régulation de la tension au PCC de l'éolienne à vitesse fixe et du réseau, en utilisant un STATCOM multiniveaux à distribution du potentiel commun «Neutral Point Clamped» (NPC). L'intérêt d'utiliser des convertisseurs à niveaux multiples réside dans leur capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité, une baisse de la fréquence de commutation, la réduction des pertes d'énergie et une diminution de l'effort des composants statiques. Aussi, l'utilisation d'un STATCOM multi niveaux diminue la taille des batteries [9].

Ainsi, ce projet vise à étudier des structures d'onduleurs multiniveaux utilisées dans des applications de compensateur statique synchrone. Cette étude nous permettra de choisir entre la topologie d'onduleur multiniveaux NPC et celle cascade en pont H présentant les meilleures performances (compensation de puissance réactive, Ride Through, facilité de réalisation, etc.) pour fournir, à une charge ou à une éolienne à vitesse fixe connectée à un réseau local, les puissances active et réactive désirées pour le maintien d'une tension constante au PCC.

1.2 Méthodologie de recherche

Pour arriver aux objectifs proposés, nous suivrons une méthodologie basée sur cinq étapes. Chaque étape comporte des activités spécifiques ordonnées chronologiquement.

1. Nous commencerons par une recherche bibliographique. Cette première étape nous a permis de faire un état de l'art sur notre sujet de recherche. L'aspect Ride Through des éoliennes, et la compensation de la puissance réactive traités dans la littérature ont été abordés.

2. Ensuite nous ferons des analyses théoriques et comparatives de structures triphasées des structures d'onduleurs multiniveaux de type NPC et cascade en pont H.
3. Les structures et algorithmes de commande présentant les meilleures performances (compensation de puissance réactive, Ride Through, facilité de réalisation, etc.) seront modélisés et simulés dans l'environnement Matlab/ Simulink/ SimpowerSystems.
4. La structure d'ondeur multiniveaux retenue pour notre application sera modélisée et simulée avec son algorithme de commande. Aussi nous analyserons le transfert de puissance pour le système STATCOM choisi, réseau et charge tout en montrant l'impact d'un STATCOM sur la variation de la tension au PCC entre un réseau électrique et un parc éolien à vitesse fixe.
5. Le travail finira par une validation expérimentale. Nous réaliserons des onduleurs monophasés de niveaux trois de type NPC et cascade en pont H.

1.3 Organisation du mémoire

L'organisation du mémoire suit les étapes de la méthodologie de recherche. Le chapitre 1 est dédié à la présentation du sujet, ensuite au chapitre 2 sont faites les études théorique et comparative des structures d'onduleurs multiniveaux de type NPC et cascade en pont H. Le chapitre 3 présente la modélisation et la simulation dans Matlab/ Simulink/ SimpowerSystems des topologies d'onduleurs étudiées précédemment. Ensuite nous présenterons dans le chapitre 4 une analyse de transfert de puissance pour le système onduleur NPC à trois niveaux, réseau et charge, dans le même chapitre un exemple montrant l'impact d'un STATCOM sur la tension au PCC entre un réseau électrique et un parc éolien à vitesse fixe est montré. Enfin, dans le chapitre 5 sont présentés les résultats expérimentaux et leur analyse faite sur des bras d'onduleurs de niveaux trois de type NPC et cascadié en pont H.

Chapitre 2 - Études théorique et comparative des différentes topologies de STATCOMS

Les motivations principales qui sont à l'origine des onduleurs multiniveaux sont d'une part l'augmentation de puissance par le biais de la génération de tensions plus élevées, au-delà de celles compatibles avec les tensions de blocage des dispositifs à semi-conducteurs de puissance. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire qui présentent un contenu harmonique réduit [9, 10].

Ainsi, l'intérêt d'utiliser des convertisseurs à niveaux multiples réside dans leur capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité, une baisse de la fréquence de commutation, la réduction des pertes d'énergie et une diminution de l'effort des composants statiques [9]. Aussi, l'utilisation d'un STATCOM multiniveaux diminue la taille des batteries [6].

Parmi les topologies d'onduleurs multiniveaux, on distingue l'onduleur multiniveaux à potentiels distribués NPC (Neutral Point Clamped), l'onduleur multiniveaux cascadié en ponts "H" et l'onduleur multiniveaux à cellules imbriquées, qui sont représentées sur la figure 2.1.

En général pour les convertisseurs multiniveaux, le nombre de niveaux N est donné par $N = P + 1$, avec P le nombre de paires d'interrupteurs complémentaires par phase. Le nombre de niveaux se calcule dans le cas d'onduleur NPC par $N = \frac{m}{2} + 1$, avec m le nombre d'interrupteurs par phase; et dans le cas d'onduleur à ponts en 'H' cascadiés par $N = 2NH + 1$, avec NH nombre de ponts par phase.

L'onduleur NPC et l'onduleur cascadié sont les topologies les plus répandues dans des applications de STATCOM; donc nous allons faire la comparaison de ces deux

topologies. Le tableau 2.1 résume les résultats de comparaison de ces deux types de topologies d'onduleur multiniveaux [9, 11].

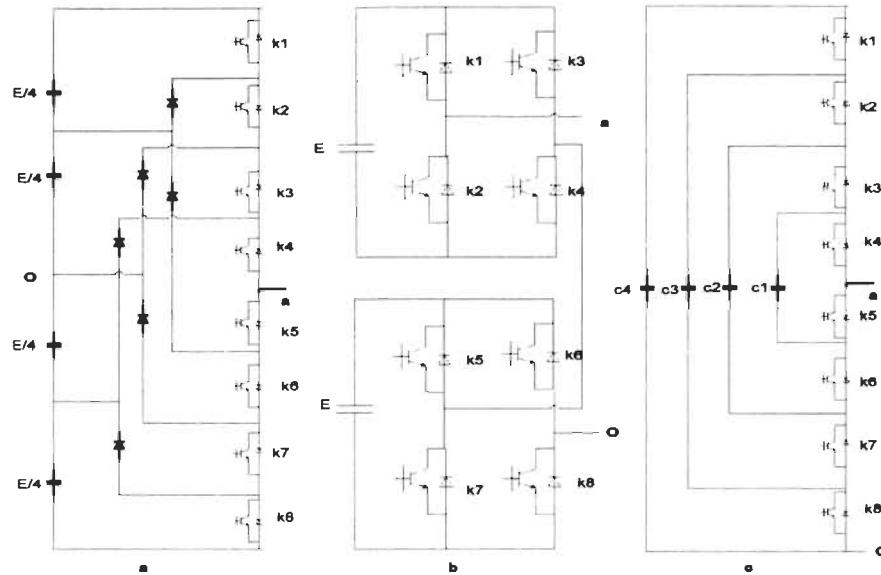


Figure 2.1 Topologies d'onduleur à 5 niveaux a) NPC; b) cascade en pont 'H' Cascadés; c) cellules imbriquées.

Tableau 2-1 Nombre de composants par topologie pour un convertisseur de N niveaux.

Topologie	NPC	Cascade en pont H
Nombre d'interrupteurs	$2(N - 1)$ par phase	$2(N - 1)$ par phase
Diodes de maintien	$2(N - 2)$ par phase	0
Condensateurs de bus CC	$(N - 1)$	$(N - 1) / 2$ par phase
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Tension et puissances de sortie élevées 	<ul style="list-style-type: none"> - Modularité - Faibles pertes de commutation - Absence de diodes de maintien
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes de commutation élevée - Commande complexe - Nombre de diodes de maintien élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation isolée pour chaque pont - Tension et puissance de sortie moins élevées

Remarque : Les deux topologies donnent un rendement dynamique comparable quant aux commandes de puissances active et réactive [9].

2.1 Onduleur à trois niveaux de tensions de type NPC

2.1.1 Structure

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la figure 2.2. Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux [11]. La tension totale du bus continu vaut E; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $\frac{E}{2}$ à leurs bornes.

Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K_1 , K_2 , K_3 et K_4 pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

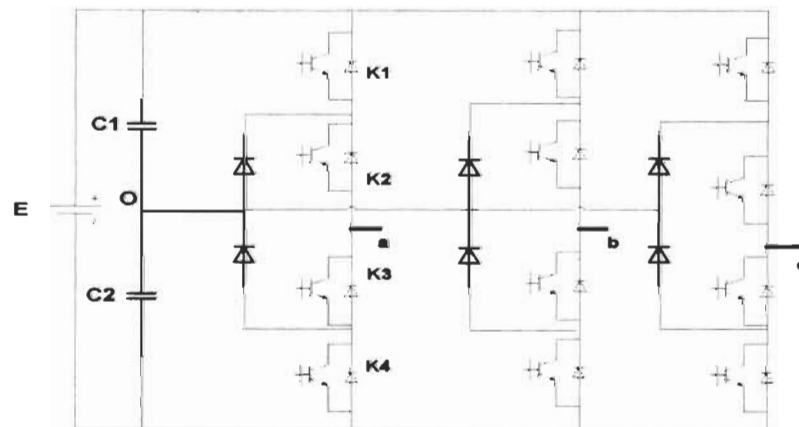


Figure 2.2 Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux

2.1.2 Principe de fonctionnement

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Le sens positif ou négatif des courants I_{d0} , I_{d1} et I_{d2} , fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant (figure 2.3).

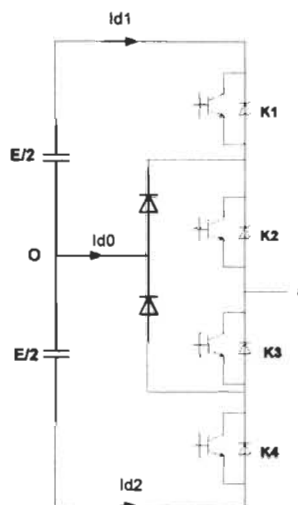


Figure 2.3 Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions.

Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement :

- Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1 , K_2 sont passants et K_3 , K_4 sont bloqués comme le montre la figure 2.4-a. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = +\frac{E}{2}$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_3, K_4 vaut : $V_{K_3} = V_{K_4} = +\frac{E}{2}$.

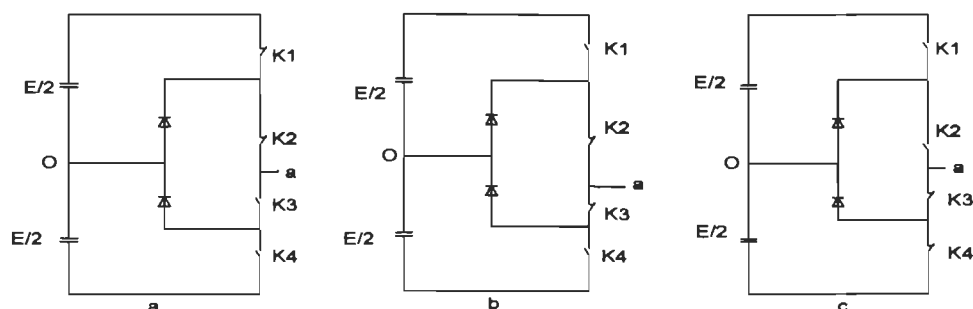


Figure 2.4 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux

- Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs K_2, K_3 sont passants et K_1, K_4 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point O à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure 2.4-b. Et la tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_4 vaut : $V_{K_1} = V_{K_4} = +\frac{E}{2}$

- Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1, K_2 sont bloqués et K_3, K_4 sont passants comme le montre la figure 2.4-c. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = -\frac{E}{2}$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_2 vaut : $V_{K_1} = V_{K_2} = +\frac{E}{2}$.

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau 2.2.

Tableau 2-2: États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux

K_1	K_2	K_3	K_4	V_{ao}
1	1	0	0	$E/2$
0	0	1	1	0
0	1	1	0	$-E/2$

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure 2.5.



Figure 2.5 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux

Commentaire : Nous remarquons que le temps de conduction de chaque interrupteur est réduit par rapport à celui des interrupteurs d'un convertisseur classique à deux niveaux, chaque interrupteur bloque une tension de $\frac{E}{2}$ dans le cas NPC à trois niveaux au lieu de E pour l'onduleur classique deux niveaux. A chaque changement de niveau de tension, on a deux interrupteurs qui commutent.

2.2 Onduleur à cinq niveaux de type NPC

2.2.1 Structure

Chaque phase de l'onduleur triphasé NPC à cinq niveaux de tensions est composée de huit interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant (il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle) et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu.

L'onduleur est alimenté par une source continue E , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension $E/4$.

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la figure 2.6.

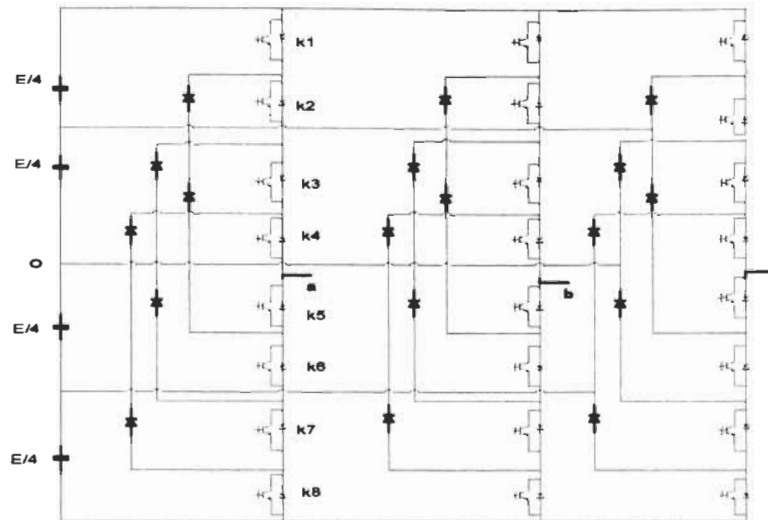


Figure 2.6 Schéma d'un onduleur NPC à 5 niveaux

2.2.2 Principe de fonctionnement

Nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de cinq niveaux, figure 2.7. L'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Dans ce cas, nous avons cinq séquences de fonctionnement possible :

- Séquence 1: K_1 , K_2 , K_3 et K_4 sont passants et K_5 , K_6 , K_7 et K_8 sont bloqués

Alors, le point a est reliée directement à la borne positive du premier étage de tension $\frac{E}{4}$ et le point O est relié à la borne négative du deuxième étage de tension $\frac{E}{4}$ ce qui

implique que la tension de sortie vaut : $V_{ao} = +\frac{E}{2}$

- Séquence 2:

K_2 , K_3 , K_4 et K_5 sont passants et K_6 , K_7 , K_8 et K_1 sont bloqués, on a: la tension de sortie est : $V_{ao} = +\frac{E}{4}$

▪ Séquence 3:

K_3, K_4, K_5 et K_6 sont passants et K_7, K_8, K_1 et K_2 , sont bloqués, on a:

La tension de sortie est : $V_{ao} = 0$

▪ Séquence 4:

K_4, K_5, K_6 et K_7 sont passants et K_8, K_1, K_2 et K_3 sont bloqués, on a: la tension de sortie est : $V_{ao} = -\frac{E}{4}$

▪ Séquence 5:

K_5, K_6, K_7 et K_8 sont passants et K_1, K_2, K_3 et K_4 , sont bloqués, on a:

La tension de sortie est : $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

Remarque : Les tensions bloquées par les différents interrupteurs au cours des séquences de fonctionnement valent toutes :

$$V_{K_i} = +\frac{E}{4} \quad i = 1 \dots 8$$

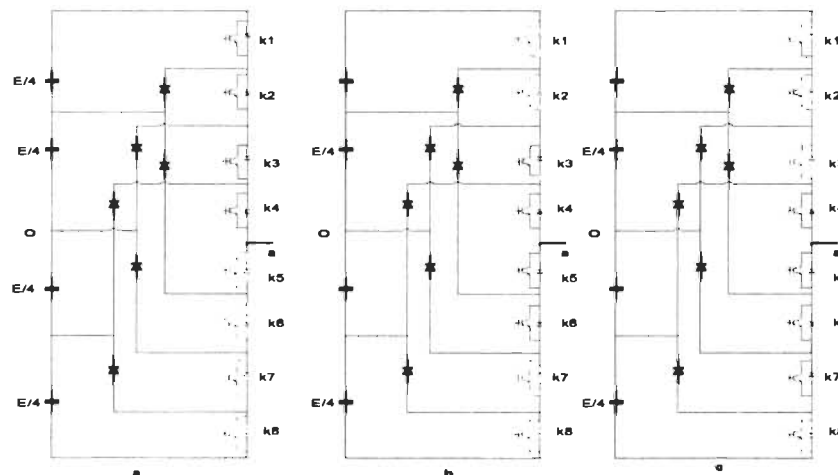


Figure 2.7 NPC 5 niveaux : Principe de commutation a-) Génération de $V_{ao} = \frac{E}{2}$, b-)

Génération de $V_{ao} = 0$, c-) Génération de $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

Les différentes séquences de fonctionnement et l'état des interrupteurs commandés sont regroupés dans le tableau 2.3.

Tableau 2-3: États possibles de l'onduleur NPC à 5 niveaux

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	V_{ao}
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure 2.8.

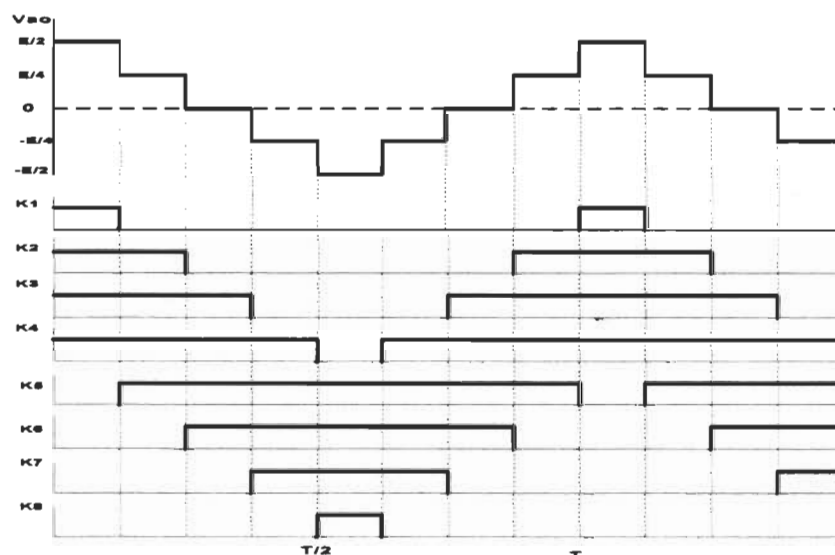


Figure 2.8 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC 5niveaux

Commentaire : On remarque que plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède de paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde. Donc la tension de sortie du convertisseur NPC 5 niveaux est meilleure du point de vue taux de distorsion harmonique que celle d'un NPC à trois niveaux. Un autre avantage du NPC à cinq niveaux les interrupteurs commandés bloque une tension

$(V_{K_1} = +\frac{E}{4})$ deux fois plus faible que celle bloquée par les interrupteurs du convertisseur à trois niveaux ($V_{K_1} = +\frac{E}{2}$). On a deux commutations à chaque changement de niveau de la tension de sortie.

2.3 Généralisation de la structure NPC à N niveaux de tension

2.3.1 Structure :

En se basant sur l'étude faite sur les onduleurs de tension de type NPC à trois et à cinq niveaux, on peut étendre notre étude à des convertisseurs à N niveaux de tensions de type NPC. La figure 2.9 montre un schéma possible de branche d'onduleur NPC constitué de N étages. Les condensateurs C_1 à C_N permettent de diviser la tension d'entrée, les interrupteurs K_1 à K_N font circuler les courants entrant avec les diodes D_1 à D_N . L'ensemble forme ainsi une cellule de commutation.

Pour un onduleur à N niveaux, le nombre des éléments constituant sa topologie, notamment les condensateurs C, les interrupteurs K (par phases) et les diodes de bouclage ou de maintien D (par phase) sont régis par les relations suivantes: $C = N - 1$, $K = 2(N - 1)$, $D = 2(N - 2)$

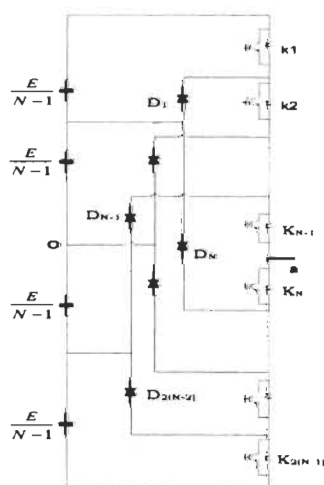


Figure 2.9 Bras d'onduleur NPC à N niveaux de tension

2.3.2 Principe de fonctionnement :

Pour un convertisseur NPC à N niveaux de tension, nous avons N-1 interrupteurs commandés complémentaires par phases. Et nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions comme le montre le tableau 2.4.

Tableau 2-4: États possibles de l'onduleur NPC à N niveaux

K_1	K_2	...	$K_{(N+1)/2}$	...	K_{N-1}	K_N	.	$K_{3(N-1)/2}$	...	K_{2N-3}	$K_{2(N-1)}$	V_{ao}
1	....	...		...	1	0	.			...	0	$\frac{E}{2}$
0	1	...			.	1	0			....	0	$\frac{N-3}{2(N-1)} E$
.	0											....
												$\frac{E}{N-1}$
.		0	1	...	....	..		1	0	...	0	0
.			0	1	...			....	1	0	0	$-\frac{E}{N-1}$
											
0	..	0			1	...	....			1	0	$-\frac{N-3}{2(N-1)} E$
0	.....	..			0	1	...			...	1	$-\frac{E}{2}$

La $m^{ème}$ séquence de fonctionnement correspondra à l'état où, les interrupteurs K_m jusqu'à K_{N+m-2} sont fermés et les autres interrupteurs ouverts.

2.4 Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont H

2.4.1 Structure

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure 2.10.

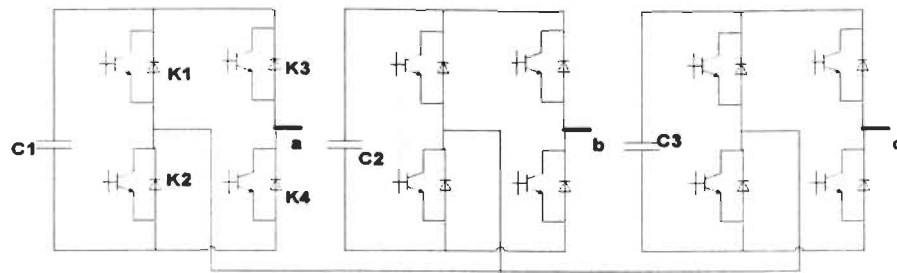


Figure 2.10 Schéma triphasé d'un onduleur cascade en pont H à 3 niveaux

Les cellules y sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle [10]. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue E et est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série [10].

2.4.2 Principe de fonctionnement

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont H à trois niveaux de tension, nous allons nous limiter notre étude à sa structure monophasée, figure 2.11.

La structure d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont H est identique à celui d'un onduleur classique monophasé en pont complet voir figure 2.11. Cependant la technique de commande est différente ce qui permettra d'avoir les trois niveaux de tension.

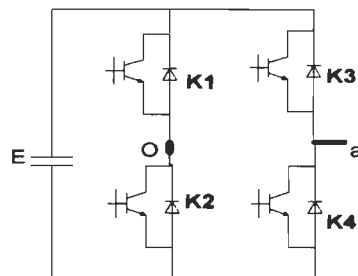


Figure 2.11 Bras d'onduleur cascade en pont H à trois niveaux

L'objectif visé est donc de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{oa} pour les différents états possibles des interrupteurs, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Comme pour le cas de l'onduleur NPC trois niveaux, nous avons trois séquences de fonctionnement possibles :

- Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1 , K_4 sont passants et K_2 , K_3 sont bloqués comme le montre la figure 2.12-a. Et la tension de sortie V_{oa} est : $V_{oa} = +E$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_2 , K_3 vaut : $V_{K_3} = V_{K_2} = +E$.

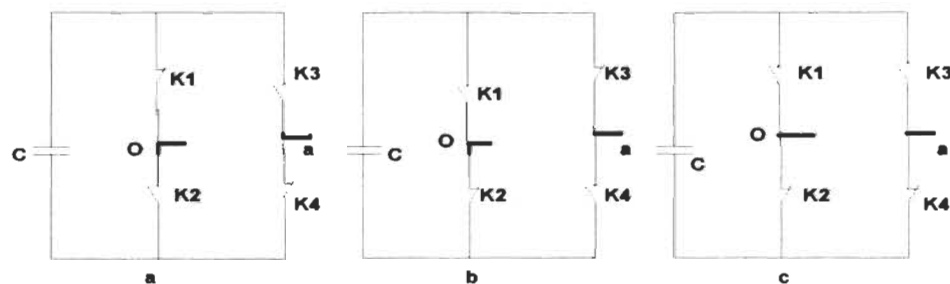


Figure 2.12 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en H

- Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs K_2 , K_4 sont passants et K_1 , K_3 sont bloqués comme le montre la figure 2. 12-c. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{oa} = 0$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1 , K_3 vaut: $V_{K_1} = V_{K_3} = +E$.

- Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1 , K_4 sont bloqués et K_2 , K_3 sont passants comme le montre la figure 2.12-b. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{oa} = -E$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1 , K_4 vaut : $V_{K_1} = V_{K_4} = +E$.

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau 2.5.

Tableau 2-5: États possibles de l'onduleur Cascade à 3 niveaux

K_1	K_2	K_3	K_4	V_{oa}
1	0	0	1	+E
0	1	0	1	0
0	0	1	1	-E

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure 2.13:

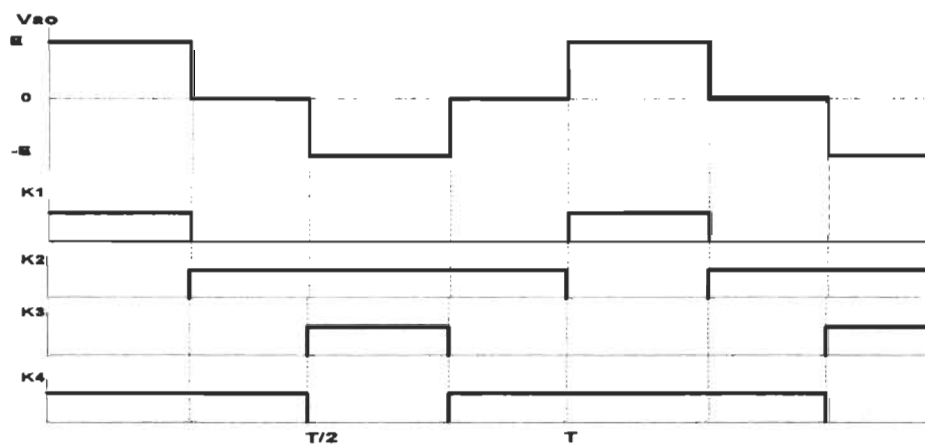


Figure 2.13 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H

Commentaire : On remarque que le temps de conduction de chaque interrupteur est identique à celui des interrupteurs du bras d'onduleur trois niveaux de type NPC. Donc les interrupteurs de l'onduleur en pont en H sont moins sollicités que ceux d'un onduleur deux niveaux. Un autre point important à chaque changement de niveau de tension, nous avons un seul interrupteur(IGBT) qui change d'état. Ce qui réduit considérablement les pertes par commutations.

2.5 Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont H

2.5.1 Structure

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure 2.14

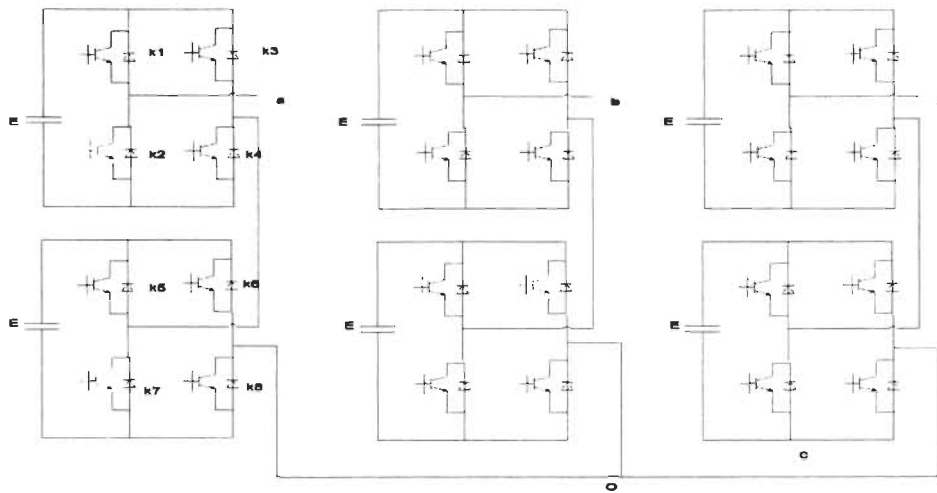


Figure 2.14 Schéma d'un onduleur cascade en H à 5 niveaux

2.5.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tension, sera illustré par sa structure monophasée, figure 2.15.

La structure d'un bras d'onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H est l'association en cascade de deux onduleurs classiques monophasés en pont complet. De telle sorte que la tension à la sortie de l'onduleur obtenue est la somme des tensions de sortie des deux onduleurs classiques.

Comme pour le cas NPC, nous avons les cinq séquences de fonctionnements suivantes pour le convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tensions:

- Séquence 1: K_1 , K_4 , K_5 , et K_8 sont passants et K_2 , K_3 , K_6 , et K_7 sont bloqués

Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E et second pont monophasé (celui du bas) donne également E comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascade H à cinq niveaux de tensions :

$$V_{oa} = E + E = 2E$$

- Séquence 2: K_1 , K_4 , K_5 et K_6 sont passants et K_2 , K_3 , K_7 et K_8 sont bloqués,

On a toujours E à la sortie du premier pont, mais cette fois ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension $V_{oa} = E$

- Séquence 3: K_2, K_4, K_7 et K_8 sont passants et K_5, K_6, K_1 et K_3 , sont bloqués,

On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont en H obtenue vaut : $V_{oa} = 0$

- Séquence 4: K_2, K_3, K_6 et K_7 sont passants et K_1, K_4, K_5 et K_8 sont bloqués,

Dans ce cas, la tension de sortie est : $V_{oa} = -E$

- Séquence 5: K_2, K_4, K_5 et K_6 sont passants et K_1, K_3, K_7 et K_8 , sont bloqués,

On a alors la tension de sortie $V_{oa} = -E - E = -2E$

Remarque: Les tensions bloquées par les différents interrupteurs au cours des séquences de fonctionnement valent toutes :

$$V_{K_i} = E, i = 1 \dots 8$$

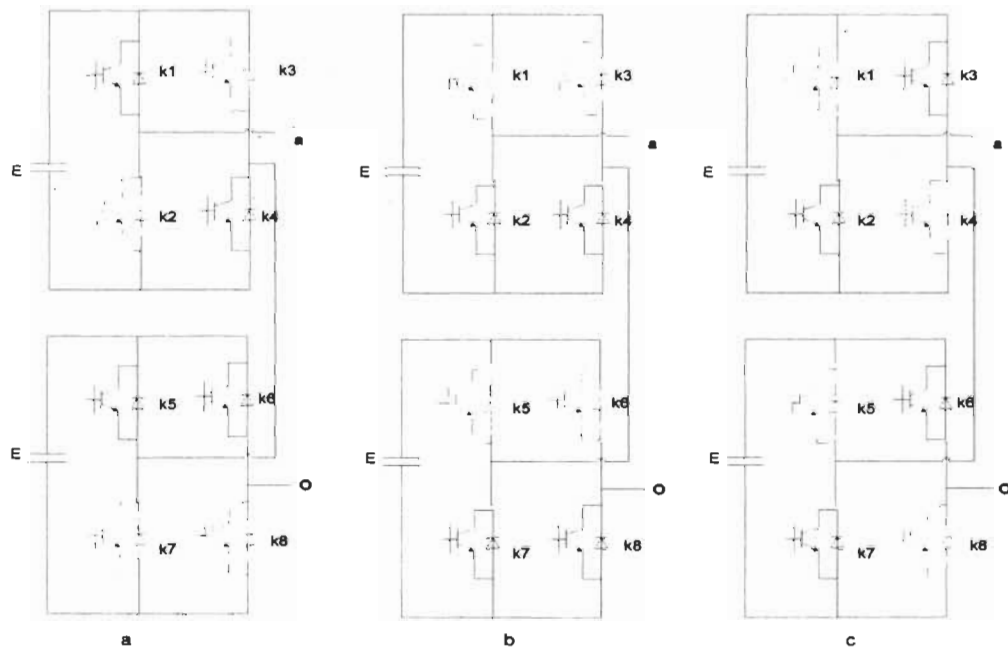


Figure 2.15 Pont H 5 niveaux : Principe et exemples de mécanisme de commutation a-) Génération de $V_{oa} = +E$, b-) Génération de $V_{oa} = 0$, c-) Génération de $V_{oa} = -2E$

Les cinq états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau 2.4.

Tableau 2-6: États possibles de l'onduleur cascade à 5 niveaux

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	V_{out}
1	0	0	1	1	0	0	1	$2E$
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	$-E$
0	1	1	0	0	1	1	0	$-2E$

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure 2.16:

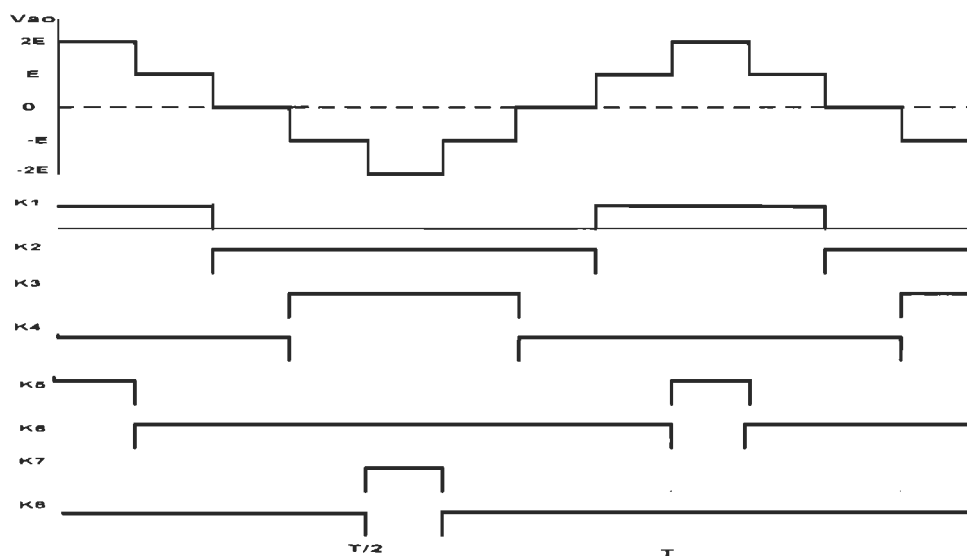


Figure 2.16 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H 5niveaux

Commentaire : Le signal de la tension de sortie obtenue présente plus de paliers dans ce cas que celui à trois niveaux. Ce qui implique logiquement un signal plus proche d'une sinusoïdale, donc moins de TDH. Un autre point important est qu'à chaque changement de niveau de tension, nous avons deux interrupteurs (IGBT) qui changent d'états alors que dans le cas de l'onduleur trois niveaux on a seulement une seule commutation à chaque changement de niveau. Cependant, par période on a quatre (4) commutations dans

le cas cinq niveaux et six (6) commutations dans le cas cascadié trois niveaux. Ainsi, il y aura plus de perte par commutation pour l'onduleur cascade en pont H.

Il reste à signaler qu'on a moins de pertes par commutation dans le cas du convertisseur cascade en H que dans le cas de l'onduleur NPC. En effet, à chaque changement de niveau dans le cas cascadié trois, on a une seule commutation et deux commutations pour le cas NPC trois niveaux. Et pour le modèle cinq niveaux, à chaque changement de niveau de la tension de sortie, on a deux commutations dans les deux cas. Mais la présence des diodes (non idéales en pratique) de maintien pour le cas NPC redonne l'avantage au convertisseur cascade en pont H du point de vue pertes par commutation.

2.6 Généralisation de la structure cascade en pont H à N niveaux de tension

2.6.1 Structure

La structure triphasée d'un convertisseur de type cascadié à N niveaux de tension est présentée à la figure 2.18. Chaque phase du convertisseur est constituée de $(N-1)/2$ étages de ponts monophasés classiques, ces ponts sont montés en cascade de telle sorte que la tension de sortie de notre onduleur cascade en pont H est la somme des tensions de sorties de chaque pont monophasé. Aussi, par phase nous avons $2(N-1)$ interrupteurs commandés $\frac{N-1}{2}$ et sources continues.

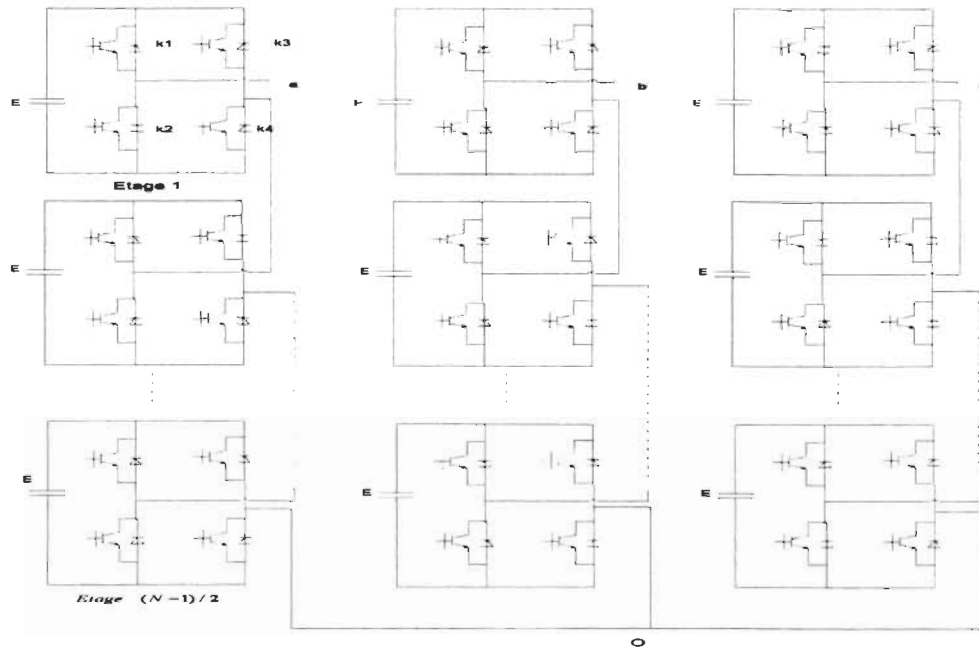


Figure 2.17 Schéma d'un onduleur cascade en pont H à N niveaux

2.6.2 Principe de fonctionnement

Dans chaque pont monophasé classique, nous avons deux interrupteurs commandés en complémentaire. Ainsi, le choix des interrupteurs à fermer ou à ouvrir dépendra de la valeur de la tension de sortie escomptée. Pour obtenir le niveau E de chaque étage, les interrupteurs K_1 et K_4 doivent être fermés et les interrupteurs K_2 et K_3 ouverts. Ce qui donnera à la sortie du convertisseur cascadié en H une tension de $V_{oa} = \frac{N-1}{2}E$. Pour le niveau $-E$ de chaque étage K_1 et K_3 sont ouverts et K_2 et K_4 sont fermés. Pour le niveau 0 de chaque étage, on ferme deux interrupteurs voisins de bras différent (par exemple K_2 et K_3) et les deux autres restent ouverts.

Et pour les N niveaux de tensions du convertisseur cascadié en pont H, nous combinerons différents états de la tension de sortie de chaque étage. Le premier niveau de tension correspond à $V_{oa} = \frac{N-1}{2}E$ et le dernier niveau sera $V_{oa} = -\frac{N-1}{2}E$

2.7 Technique de commande des convertisseurs multiniveaux

Plusieurs méthodes de commande pour générer les signaux PWM (pulse width modulation) des convertisseurs multiniveaux ont été étudiées au cours des deux dernières décennies, et un bon nombre de résultats sont publiés. Nous distinguons deux techniques de PWM : la technique de modulation intersective et les techniques numériques d'espace vectoriel [12].

Récemment, avec le développement de la technologie numérique, le SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) est largement utilisé, non seulement en raison de sa mise en œuvre relativement facile, mais aussi de la qualité des signaux obtenus par cette méthode, notamment la faible ondulation du courant. Mais l'inconvénient majeur de cette méthode est que, le contrôle de l'algorithme permettant de générer les signaux de commande devient trop complexe pour les convertisseurs de niveau supérieur à trois [12]. Et des recherches ont montré qu'en plus de la simplicité de la commande MLI, cette commande donne aussi de signaux de qualité [12] [13]. Il est donc raisonnable d'adopter la technique de MLI intersective.

2.7.1 Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour générer les impulsions de commande MLI d'un convertisseur à N-niveaux de tensions, N-1 porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la même fréquence f_c et la même amplitude A_c . Les porteuses peuvent être horizontalement ou verticalement décalées. Si elles le sont horizontalement, le déphasage entre deux signaux consécutifs est donné par $\frac{2}{N-1}$. Et si elles sont décalées verticalement, les signaux triangulaires peuvent être en phase ou non et occupent une bande continue avec le même décalage vertical. Ils sont ensuite comparés au signal de référence d'amplitude A_r et de fréquence f_r . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire. A la sortie du modulateur, la somme des résultats issus des comparaisons est ensuite décodée, et donne la valeur correspondant à chaque niveau de tension [10].

Pour un convertisseur de N niveaux, l'indice de modulation en amplitude m_a et l'indice de modulation en fréquence m_f sont définies comme suit:

$$m_a = \frac{Ar}{(N-1)A_c}, \quad m_f = \frac{fc}{fr}$$

Les méthodes de modulation de largeur d'impulsion sont classées selon la disposition des porteuses triangulaires et les plus utilisées sont : [13]

- Les porteuses triangulaires disposées en phase «Phase Disposition» (PD), figure 2.18. Cette méthode est applicable aussi bien à la structure NPC qu'à la topologie en cascade en pont H. Pour les valeurs de l'indice de modulation proches de un, la méthode PD présente le plus faible taux de distorsion harmonique (TDH) comparée aux autres méthodes MLI [13].

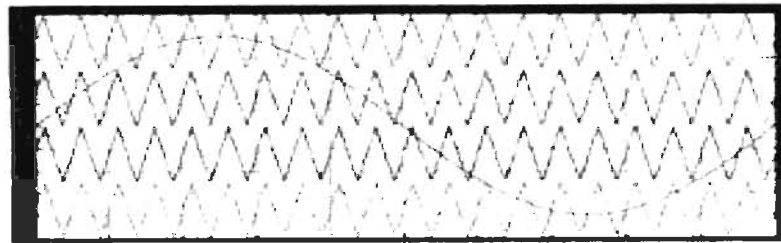


Figure 2.18 Forme d'onde des signaux PD pour 5 Niveaux

- Si les porteuses triangulaires sont disposées en opposition de phase, alors la méthode est connue sous le nom «Phase Opposition Disposition» (POD), figure 2.19. Cette méthode est plus performante que la méthode PD du point de vue harmonique pour les faibles valeurs de l'indice de modulation. Un autre avantage est que pour la fréquence porteuse et ses multiples il n'y a pas d'harmoniques et la dispersion des harmoniques se produit autour d'eux [13].

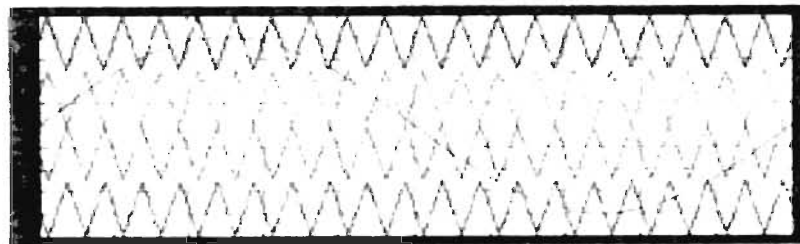


Figure 2.19 Forme d'onde des signaux POD pour 5 Niveaux

- La troisième méthode classique de MLI connue est l'APOD «Alternative Phase Opposite Disposition». Dans ce cas, chaque porteuse triangulaire est décalée de 180° par rapport à son adjacent, figure 2.20. Cette méthode donne les mêmes résultats que celle POD. La différence majeure pour cette méthode est que l'harmonique d'ordre 3 est plus grand, mais ceci n'est pas un problème car elle est éliminée dans la tension de ligne. Cette méthode permet d'obtenir une meilleure TDH pour la tension phase-phase par rapport à la méthode POD [13].

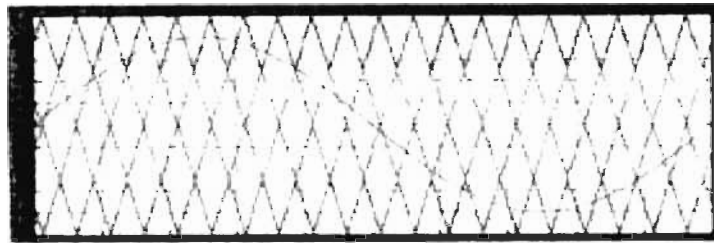


Figure 2.20 Forme d'onde des signaux POD pour 5 Niveaux

- Dans la méthode de la phase décalée, «phase shifted» (PS) toutes les porteuses ont la même amplitude et la même fréquence, mais ont leur phase décalée de 90 degrés les unes des autres, figure 2.21. Le TDH de la tension de sortie de l'onduleur commandée par cette méthode est faible pour toutes les valeurs de l'indice de modulation [13]



Figure 2.21 Forme d'onde des signaux PS pour 5 Niveaux

Les porteuses peuvent ne pas avoir la même amplitude, comme présenté dans des nouvelles méthodes de MLI de la référence [13].

2.8 Conclusion

Ce chapitre présente une étude comparative de structures d'onduleurs multiniveaux à potentiels distribués NPC (Neutral Point Clamped) et cascade en pont H. Dans la première partie, nous faisons une analyse théorique des convertisseurs NPC et cascade en pont H de niveaux trois et cinq. Ensuite, nous étendons notre étude à des structures d'onduleurs NPC et cascade en pont H à N niveaux de tension. Par la suite, nous présentons les méthodes de commande permettant de générer les impulsions de commande à modulation de largeur d'impulsions (MLI) pour les convertisseurs multiniveaux.

Ainsi, pour nos simulations, la méthode MLI choisie est celle à phase décalée. Elle est aussi simple à réaliser que les autres techniques, et présente aussi un meilleur THD et c'est pour toutes les valeurs de l'indice de modulation [13].

Chapitre 3 - Modélisation et Simulation des structures STATCOMS NPC et cascade en pont H

Ce chapitre présente les simulations dans l'environnement Matlab /Simulink/ SimPowerSystems de l'étude théorique faite dans le chapitre précédent

3.1 Développement d'un modèle de simulation Triphasé

3.1.1 Modèle d'onduleur NPC à trois niveaux développé

Nous avons développé un modèle d'onduleur NPC à trois niveaux dans l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystems comme le montre la figure 3.1.

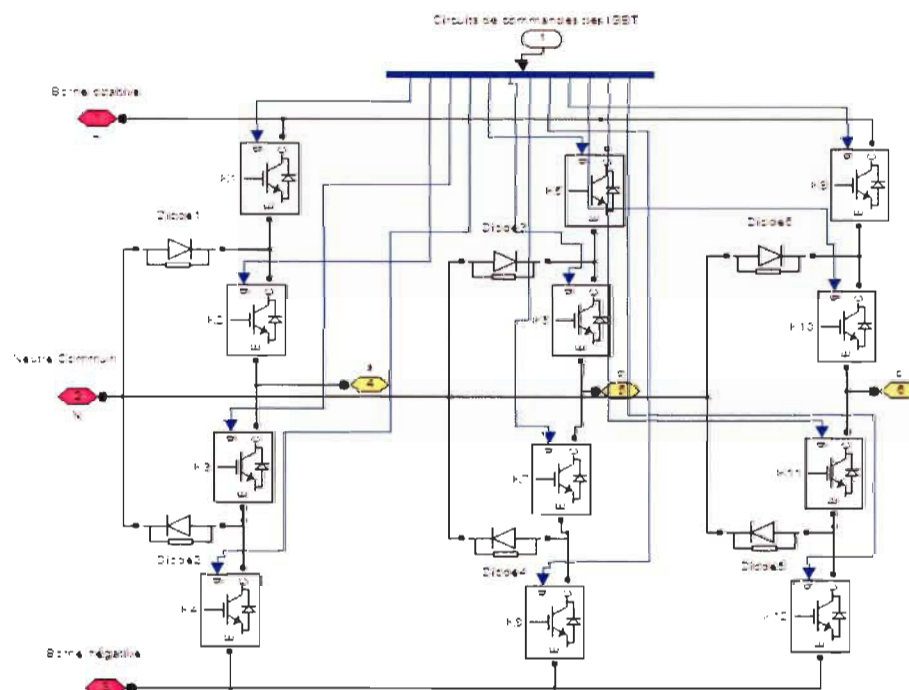


Figure 3.1 Modèle développé d'onduleur NPC à trois niveaux

a) Validation du modèle NPC

Pour valider notre modèle développé, nous avons fait le circuit de la figure 3.2 en vue de comparer les résultats de simulation du modèle développé avec le modèle existant de Matlab/Simulink/SimPowerSystems. On s'est servi du bloc MLI de Matlab/Simulink/SimPowerSystems pour commander en boucle ouverte les deux modèles d'onduleur pour un indice de modulation de 0.85 et des fréquences de la porteuse allant de 1 à 10 kHz (tableau 3. 1).

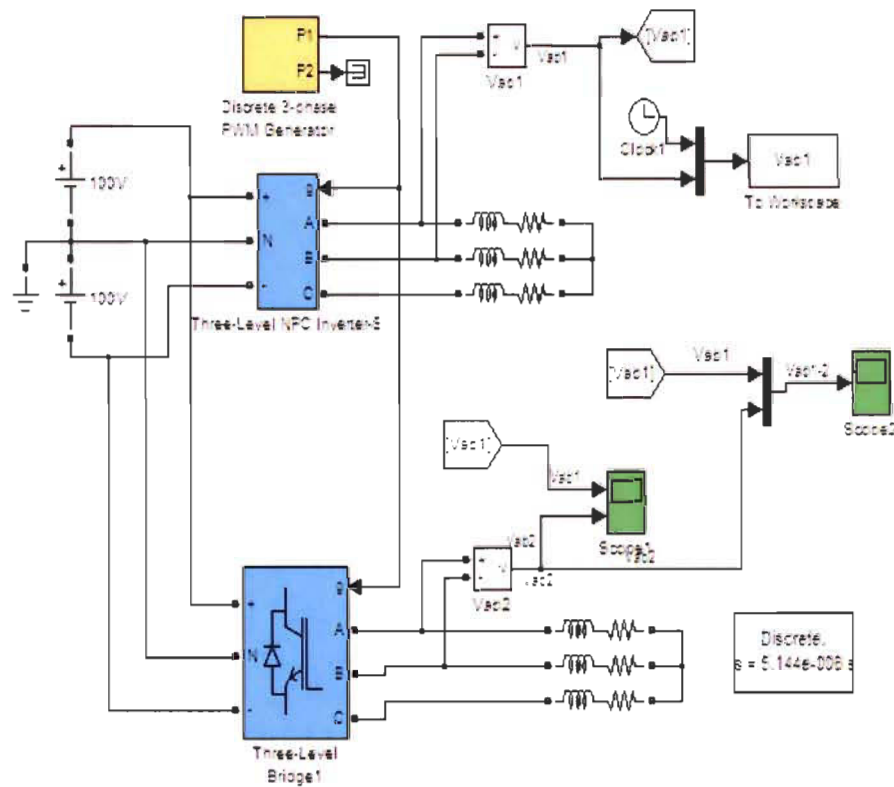


Figure 3.2 : Schéma de simulation des deux modèles

Tableau 3-1: Comparaison des résultats de simulation des deux modèles d'onduleur

Fréquence de la porteuse(Hz)	Type de Modèle	Valeur crête de la composante fondamentale de la tension (V)	Le taux de distorsion d'harmoniques TDH (%)
1080	SimPowerSystems	160.7	40.78
	Développé	161.6	40.63
3000	SimPowerSystems	161.3	40.95
	Développé	161.5	40.81
6000	SimPowerSystems	161.7	40.79
	Développé	161.9	40.66
9600	SimPowerSystems	161.5	40.73
	Développé	161.6	40.59

Commentaires : On observe, à partir du tableau précédent, que les deux onduleurs donnent des valeurs de tension de sortie presque identiques, de même que le TDH.

3.1.2 Modèle d'onduleur cascade en pont H à trois niveaux développé

Nous avons développé un modèle d'onduleur cascade en pont H à trois niveaux dans l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystems comme le montre la figure 3.3.

Dans l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystems, on n'a pas trouvé de modèle d'onduleur cascade en pont H pour pouvoir valider notre modèle développé. Nous faisons juste une étude comparative avec l'onduleur NPC.

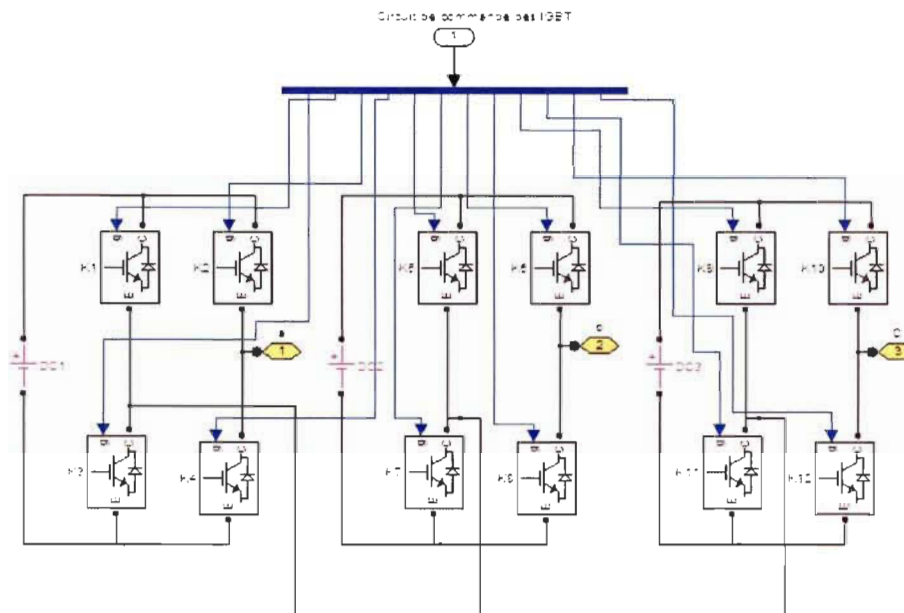


Figure 3.3 : Modèle d'onduleur NPC à trois niveaux développé

3.1.3 Analyse Comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les deux modèles d'onduleur trois niveaux

Nous proposons dans cette partie, une analyse comparative des résultats de simulations obtenues de deux modèles d'onduleur étudiés.

La méthode de commande MLI de type PS sera utilisée pour la commande des interrupteurs. Et la commande sera en boucle ouverte, pour un indice de modulation de 0.98 et 1080 Hz comme fréquence de porteuses.

Les sources continues utilisées valent pour les deux modèles 110V, nous avons aussi pris comme charge, une résistance en série avec une inductance de valeurs respectives $R = 1 \, \Omega$ et $L = 0.75 \, H$, pour un $\cos \varphi = 0.80$.

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau 3.2, et les formes d'onde et spectres des signaux, obtenus de la figure 3.4 à la figure 3.11.

Tableau 3-2: Comparaison des résultats de simulation des deux types d'onduleurs

Topologie	NPC	Cascade
Nombre d'interrupteurs	4 par phase	4 par phase
Diodes de maintien	2 par phase	0 par phase
Condensateurs de bus CC	2 par phase	1 par phase
Valeur crête de la composante fondamentale de la tension (V)	185.8	186.9
Le taux de distorsion d'harmoniques TDH (%)	41.5	41.37
Valeur crête de la composante fondamentale du courant (I)	0.38	0.38
Le taux de distorsion d'harmoniques TDH (%)	1.74	2.45

Commentaires : Nous remarquons à partir du tableau précédent, que les deux onduleurs donnent des valeurs de tension de sortie presque identiques, aussi les valeurs des courants de lignes sont identiques. Mais le TDH du courant (1.74%) est meilleur pour le cas NPC. Mais par contre du point de vue composants utilisés, l'onduleur cascade en pont H est plus intéressant.

a) L'onduleur NPC Triphasé à trois niveaux

La figure 3.4 montre les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n (v_{an}), des courants de ligne (I_a , I_b et I_c) et de la tension entre la phase a et la phase b (v_{ab}) obtenus à la sortie de l'onduleur NPC triphasé à trois niveaux. Les courbes obtenues en simulation correspondent à celles théoriques.

Les figures 3.5, 3.6 et 3.7 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux du courant I_a et des tensions v_{an} et v_{ab} . Le spectre harmonique des signaux obtenus montre que les harmoniques sont repoussées aux hautes fréquences Ce qui facilitera le filtrage au besoin.

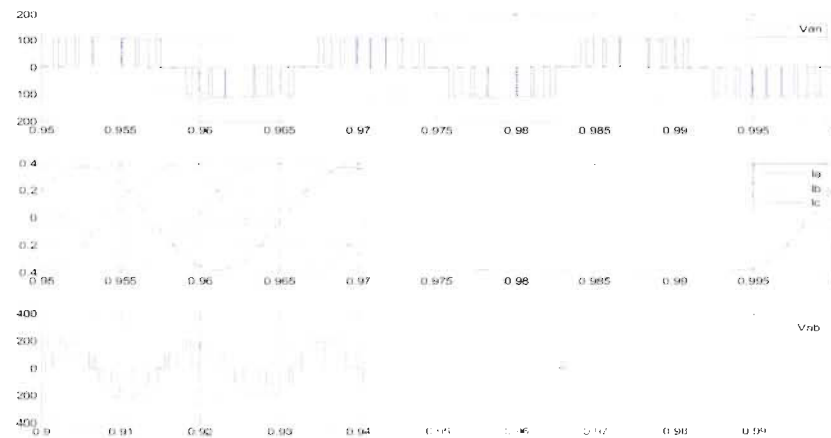


Figure 3.4 : Forme des signaux de l'onduleur NPC trois niveaux

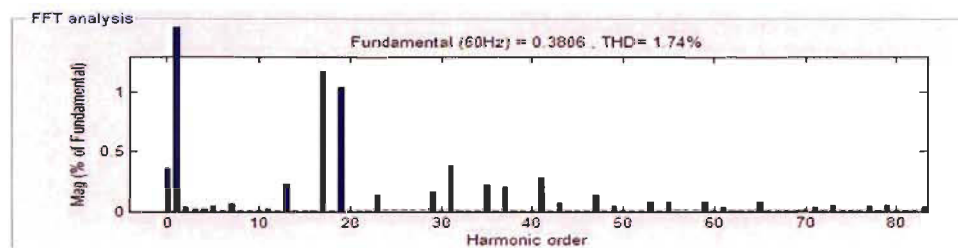


Figure 3.5 : Spectre harmonique du courant de charge NPC trois niveaux

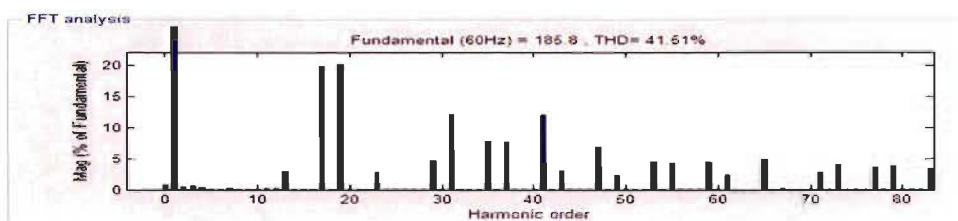


Figure 3.6 : Spectre harmonique de la tension v_{ab} du NPC trois niveaux

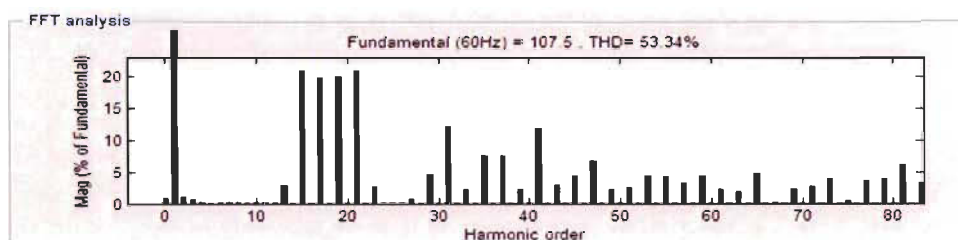


Figure 3.7 : Spectre harmonique de la tension v_{un} du NPC trois niveaux

b) L'onduleur cascade en pont H Triphasé à trois niveaux

La figure 3.8 présente les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n (v_{an}), des courants de ligne (I_a , I_b et I_c) et de la tension entre la phase a et la phase b (v_{ab}) obtenus à la sortie de l'onduleur cascade triphasé à trois niveaux. Nous obtenons les mêmes résultats que ceux obtenus avec l'onduleur NPC trois niveaux.

Les figures 3.9, 3.10 et 3.11 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux du courant I_a et des tensions v_{an} et v_{ab} .

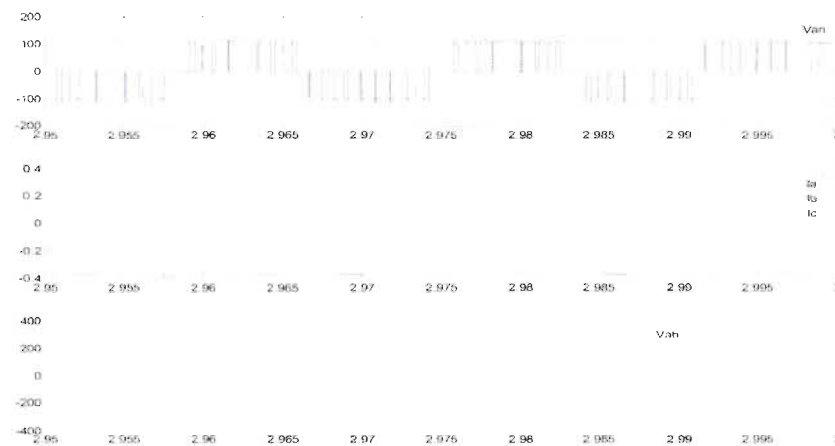


Figure 3.8 : Forme des signaux de l'onduleur cascade en pont H trois niveaux

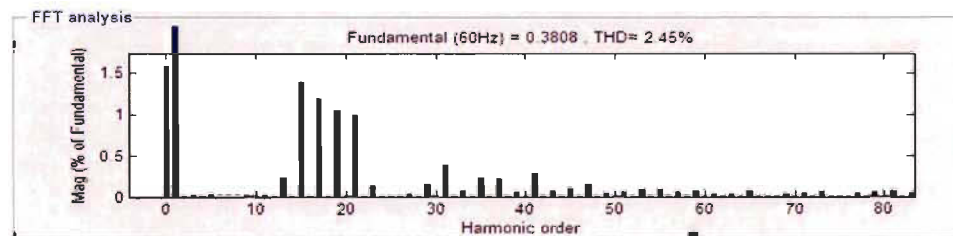


Figure 3.9 : Spectre harmonique du courant de charge de cascade en pont H trois niveaux

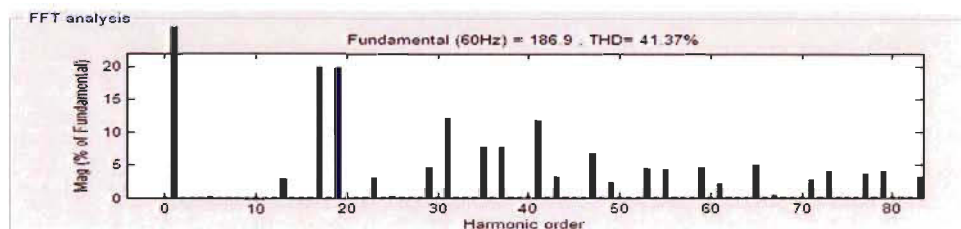


Figure 3.10 : Spectre harmonique de la tension v_{ab} de cascade en pont H trois niveaux

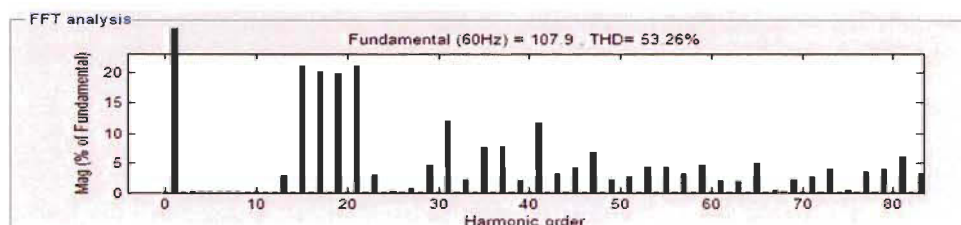


Figure 3.11 : Spectre harmonique du la tension v_{an} de cascade en pont H trois niveaux

Commentaire : Nous remarquons, dans les deux cas d'onduleurs, que les courbes obtenues correspondent bien à celles théoriques. Pour la tension simple v_{an} , nous avons les trois niveaux de tensions $+\frac{E}{2}$, 0 et $-\frac{E}{2}$ comme mentionné dans la partie théorique. Le spectre harmonique des signaux montre que les harmoniques sont repoussées aux hautes fréquences et les harmoniques d'ordre la fréquence et multiple de la fréquence de la modulante sont nulles. Ce qui facilitera le filtrage au besoin.

3.1.4 Commande par SVPWM

Dans cette partie, nous utiliserons le bloc PWM (utilisant la méthode du SVPWM) de Matlab/Simulink/SimPowerSystems pour la commande de notre modèle d'onduleur NPC étudié.

Ainsi, nous profiterons de l'occasion pour faire une analyse comparative entre les deux techniques de commandes utilisées pour les convertisseurs multiniveaux.

Pour ce faire, On s'est servi du bloc PWM de Matlab/Simulink/SimPowerSystems et de notre commande MLI de type «PS» développée pour commander en boucle ouverte l'onduleur NPC pour un indice de modulation de 0.85 et des fréquences de la porteuse allant de 1 à 10 kHz (tableau 3.3).

Les sources continues utilisées valent pour les deux modèles 110V, nous avons aussi pris comme charge, une résistance en série avec une inductance de valeurs respectives $R = 1 \, \Omega$ et $L = 0.75 \, H$.

Tableau 3-3: comparaison des méthodes de commandes SVPWM et MLI

Fréquence de la porteuse (Hz)	Type de Modèle	Valeur crête de la composante fondamentale de la tension $v_{ab}(V)$	Le taux de distorsion d'harmoniques $TDH_{v_{ab}} (\%)$	Le taux de distorsion d'harmoniques $I_{CH} TDH (\%)$
1080	MLI_NPC	161.7	59.51	2.78
	SWPW_NPC	161.6	40.63	1.30
3000	NPC	161.5	60.54	1.02
	SWPW_NPC	161.5	40.81	0.47
6000	MLI_NPC	161.7	60.40	0.52
	SWPW_NPC	161.9	40.66	0.30
9600	MLI_NPC	161.6	60.48	0.47
	SWPW_NPC	161.6	40.59	0.32
10000	MLI_NPC	161.2	60.53	0.35
	SWPW_NPC	161.7	40.71	0.22

Commentaires : Nous remarquons à partir du tableau précédent, que les deux techniques de commande donnent des valeurs de tension de sortie très proches. Mais la technique de commande SVPWM donne une meilleure performance du point de vue TDH de la tension et du courant, et justement ceci est une confirmation des résultats théoriques [12]. Mais la qualité des signaux obtenus par la méthode «PS» reste aussi très bonne, et cette méthode est moins complexe à réaliser. Nous remarquons aussi que plus qu'est grande la fréquence de la porteuse, meilleure est le courant de sortie.

3.2 Analyse comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les deux modèles d'onduleur de niveaux-5

Nous allons faire la même étude que pour les onduleurs à trois niveaux de tension.

Les mêmes conditions sont utilisées pour faciliter la comparaison des différentes structures étudiées.

La méthode de commande MLI de type PS sera utilisée pour la commande des interrupteurs. Et la commande sera en boucle ouverte, pour un indice de modulation de 0.98 et 1080 Hz comme fréquence de porteuses.

Les sources continues utilisées valent pour les deux modèles 110V, nous avons aussi pris comme charge, une résistance en série avec une inductance de valeurs respectives $R = 1 \, \Omega$ et $L = 0.75 \, H$, pour un $\cos \varphi = 0.80$.

3.2.1 Modèle Monophasé :

Les résultats de simulations sont présentés dans le tableau 3.4, et les formes d'onde et spectres des signaux, obtenues de la figure 2.12 à la figure 3.17.

Tableau 3-4: Comparaison des résultats de simulation des deux types d'onduleur

Topologie	NPC	Cascadé
Nombre d'interrupteurs	8 par phase	8 par phase
Diodes de maintien	6 par phase	0 par phase
Condensateurs de bus CC	4	2 par phase
Valeur crête de la composante fondamentale de la tension (V)	215.6	215.6
Le taux de distorsion d'harmoniques TDH (%)	24.99	25.05
Valeur crête de la composante fondamentale du courant (I)	0.76	0.76
Le taux de distorsion d'harmoniques TDH (%)	1.31	1.31

Commentaire : Les modèles d'onduleurs donnent les mêmes performances comme le montre le tableau 3.4.

a) L'onduleur NPC monophasé à cinq niveaux

La figure 3.12 montre les signaux de la tension de sortie (v_{an}), des courants de ligne (I_a , I_b et I_c) de l'onduleur NPC triphasé à cinq niveaux.

Les figures 3.12 et 3.13 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension v_{ab} et du courant I_a .

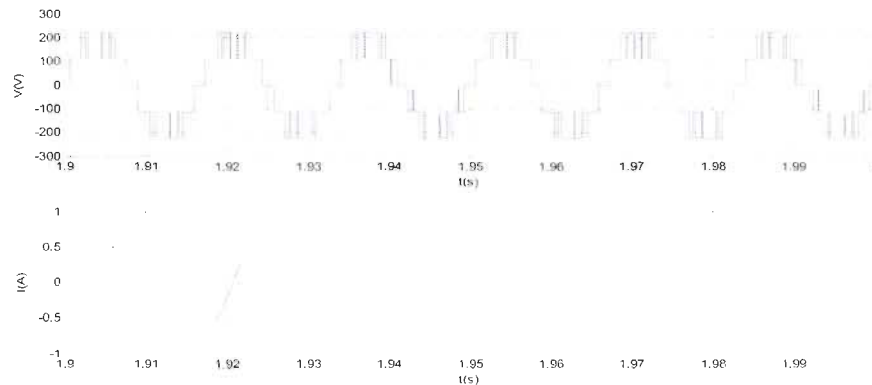


Figure 3.12 : Forme des signaux de l'onduleur NPC cinq niveaux

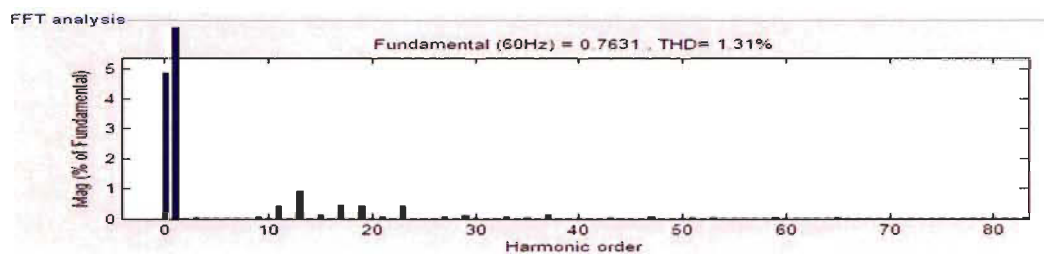


Figure 3.13 : Spectre harmonique du courant I_a

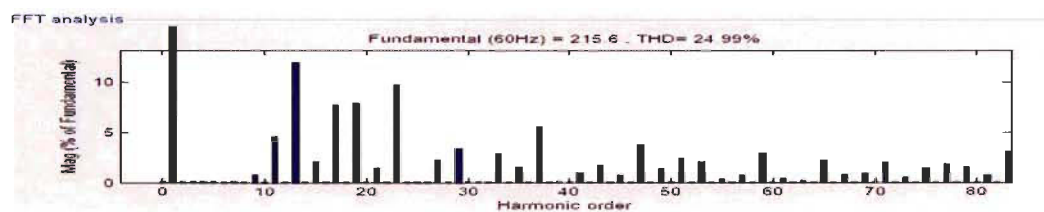


Figure 3.14 : Spectre harmonique de la tension v_{uu} de l'onduleur NPC cinq niveaux

b) L'onduleur cascade en H Monophasé à cinq niveaux

La figure 3.15 montre les signaux de la tension de sortie (v_{an}), des courants de ligne (I_a , I_b et I_c) de l'onduleur cascade en pont H triphasé à cinq niveaux. Les figures 3.16 et

3.17 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension v_{ab} et du courant I_a .

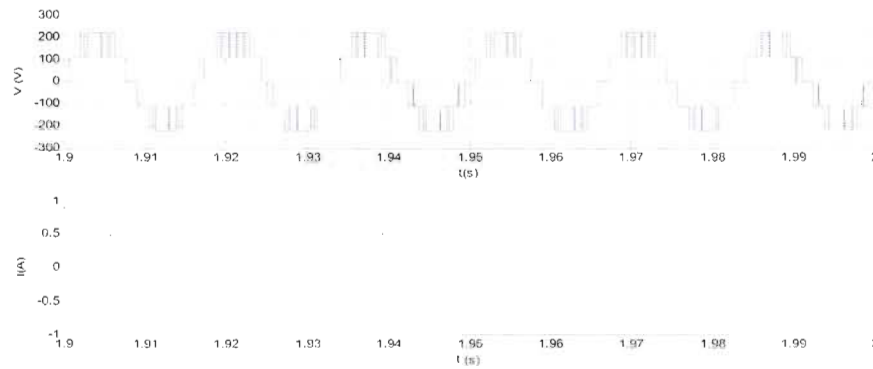


Figure 3.15 : Forme des signaux de l'onduleur cascade cinq niveaux

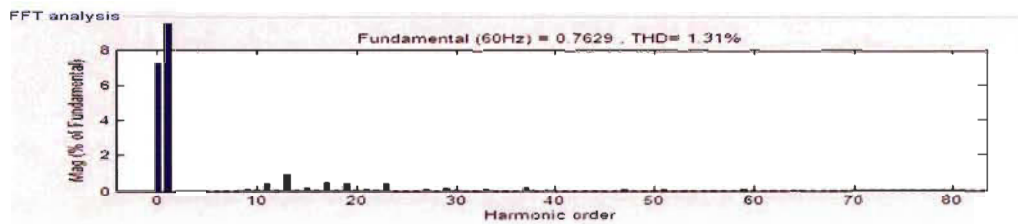


Figure 3.16 : Spectre harmonique du courant I_a de l'onduleur cascade cinq niveaux

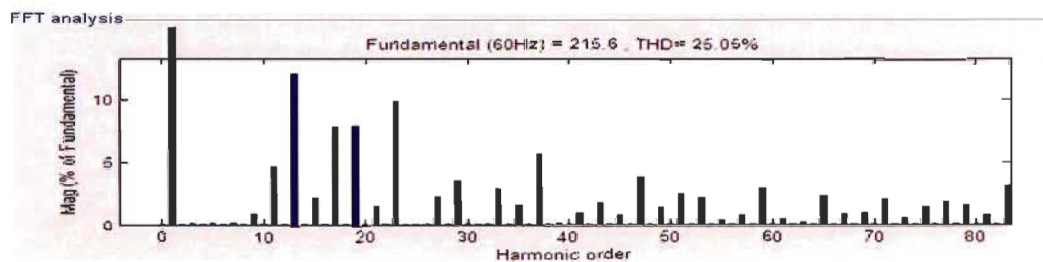


Figure 3.17 : Spectre harmonique de la tension v_{III} de l'onduleur cascade cinq niveaux

Commentaire : Les formes d'ondes obtenues correspondent bien à celles théoriques. Le taux de distorsion harmonique des signaux obtenus est meilleur pour ce cas que dans le cas des convertisseurs à trois niveaux.

3.2.2 Modèle Triphasé

Les résultats de simulations sont présentés dans le tableau 3.5, et les formes d'onde et spectres des signaux, obtenues de la figure 3.17 à la figure 3.23.

Tableau 3-5: Comparaison des résultats de simulation des deux modèles d'onduleur

Fréquence de la porteuse(Hz)	Type de Modèle	Valeur crête de la composante fondamentale de la tension v_{ab} (V)	Le taux de distorsion d'harmoniques TDH_ v_{ab} (%)	Le taux de distorsion d'harmoniques I_ $_{CH}$ TDH (%)
1080	NPC	373.3	23.37	1.29
	H	373.5	23.42	1.29
3000	NPC	373.3	26.23	0.45
	H	373.4	26.32	0.45
6000	NPC	373	26.24	0.23
	H	373.1	26.34	0.23
9600	NPC	373.7	26.06	0.19
	H	373.8	26.16	0.20

Commentaire : Nous remarquons à partir du tableau précédent, que les deux onduleurs donnent des valeurs de tension de sortie presque identiques, aussi les valeurs des courants de lignes sont identiques, ainsi que le TDH du courant et de la tension de sortie. Plus que nous augmentons la fréquence des porteuses, meilleurs sont nos signaux obtenus.

a) L'onduleur NPC triphasé à cinq niveaux

La figure 3.18 montre les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n (v_{an}), des courants de ligne (I_a , I_b et I_c) et de la tension entre la phase a et la phase b (v_{ab}) obtenus à la sortie de l'onduleur NPC triphasé à cinq niveaux. Ces courbes correspondent à celles théoriques et sont identiques que celles obtenues du convertisseur NPC cinq niveaux.

Les figures 3.19 et 3.20 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension v_{ab} et du courant I_a . Le spectre harmonique des signaux obtenus est le même que pour le cas du NPC à cinq niveaux.

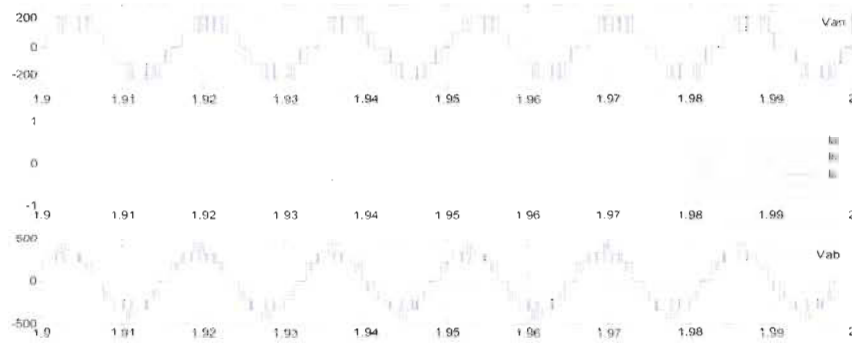


Figure 3.18 : Forme des signaux de l'onduleur triphasé NPC cinq niveaux

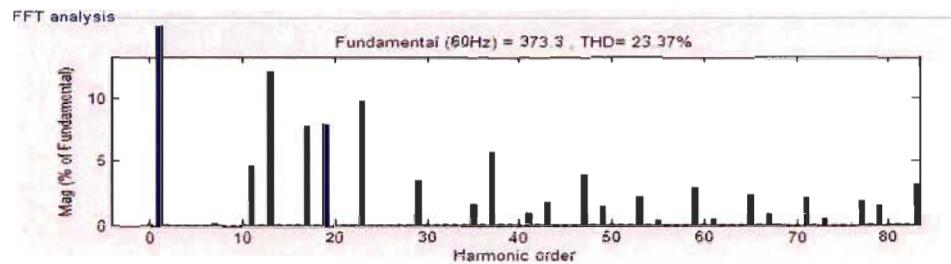


Figure 3.19 : Spectre harmonique de la tension v_{ab} l'onduleur triphasé NPC cinq niveaux

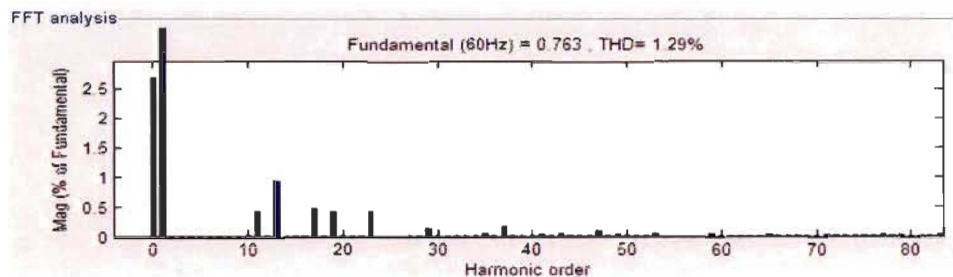


Figure 3.20 : Spectre harmonique du courant I_a l'onduleur triphasé NPC cinq niveaux

b) L'onduleur cascade en H Triphasé à cinq niveaux

La figure 3.21 présente les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n (v_{an}), des courants de ligne (I_a , I_b et I_c) et de la tension entre la phase a et la phase b (v_{ab}) obtenus à la sortie de l'onduleur cascade en pont H triphasé à cinq niveaux. On a bien nos formes d'ondes escomptées, les signaux des tensions obtenus approchent mieux une sinusoïdale par rapport à ceux obtenus des onduleurs à trois niveaux étudiés précédemment.

Les figures 3.22 et 3.23 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension v_{ab} et du courant I_a . Le taux de distorsion harmonique des signaux obtenus est meilleur pour ce cas que dans le cas des convertisseurs à trois niveaux. Et la qualité des signaux obtenus du point de vue TDH aussi est très bonne.

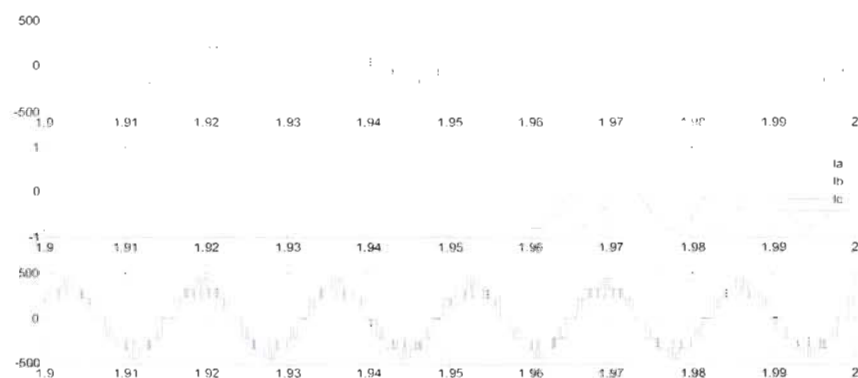


Figure 3.21 : Forme des signaux de l'onduleur cascade triphasé cinq niveaux

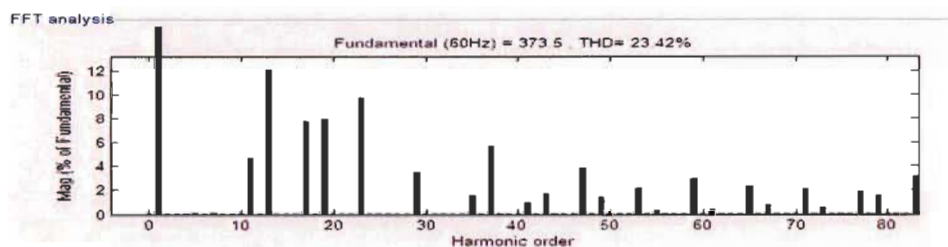


Figure 3.22 : Spectre harmonique du la tension v_{ab} de l'onduleur cascade triphasé cinq niveaux

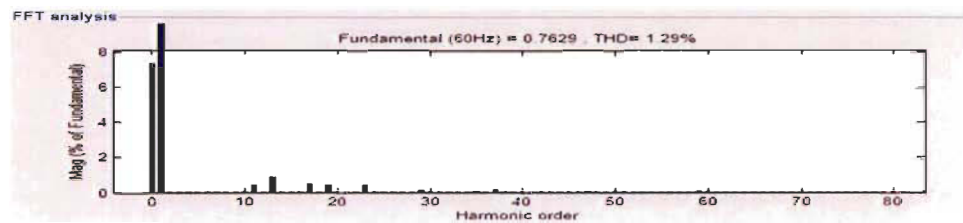


Figure 3.23 : Spectre harmonique du courant de charge de l'onduleur cascade triphasé cinq niveaux

Commentaire : On a bien nos formes d'ondes escomptées, la qualité des signaux obtenus est très bonne. On remarque aussi que les valeurs de tensions de sorties sont de 373V entre phase et 215V pour la tension simple. Et c'est pour une tension d'entrée de 110V.

3.3 Génération des signaux de la commande.

Cette partie est faite pour montrer la manière dont est faite notre commande MLI«PS» dans Matlab/Simulink/SimPowerSystems. Et nous nous limiterons juste pour le cas monophasé.

3.3.1 NPC à trois niveaux

Pour générer les impulsions de commande MLI du convertisseur à 3-niveaux de tensions, deux (2) porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la même fréquence f_c et la même amplitude A_c , figure 3.24.

Ils sont ensuite comparés au signal de référence (sinus) d'amplitude A_r et de fréquence f_r . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire.

Ainsi pour le cas NPC, les interrupteurs K_1 et K_3 sont complémentaires et les interrupteurs K_2 et K_4 sont aussi complémentaires.

La commande pour le cas du convertisseur cascade en pont H à trois niveaux se fait de la même manière, ce seulement la position des interrupteurs qui change.

Pour le cas triphasé nous ajouterons juste deux autres références de même amplitude et de même fréquence décalés respectivement de 120° et de 240° par rapport à la première.

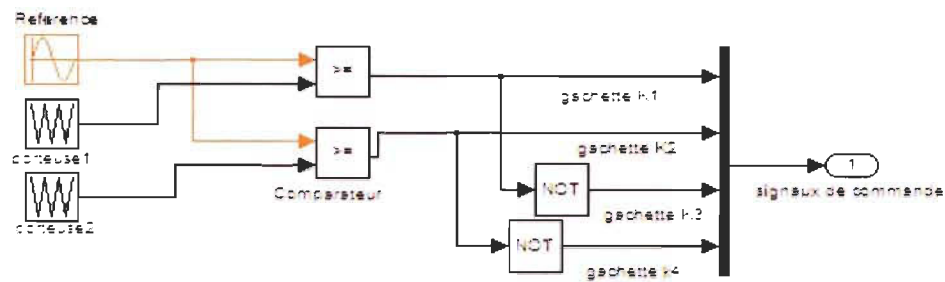


Figure 3.24 : Génération des Signaux MLI d'un onduleur NPC à trois Niveaux

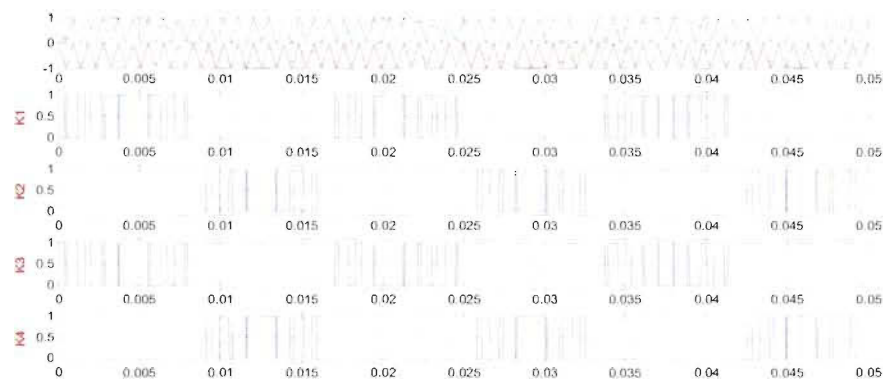


Figure 3.25 : Signaux de commande MLI d'un onduleur NPC à trois Niveaux

3.3.2 NPC à cinq niveaux

A la seule différence du cas précédent, nous aurons quatre porteuses triangulaires. La figure 3.26, nous montrons la manière utilisée pour générer les signaux MLI de l'onduleur cascade en pont H monophasé dans Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

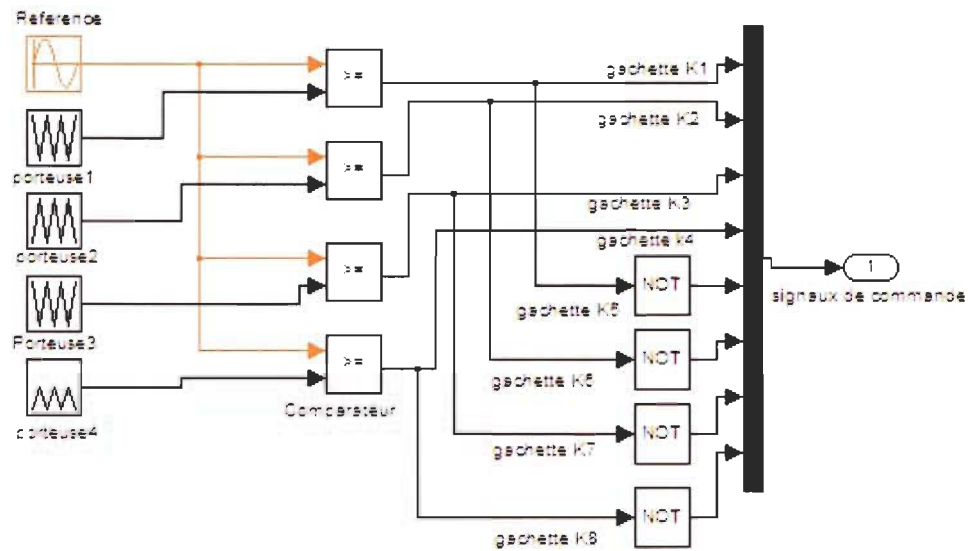


Figure 3.26 : Génération des Signaux MLI d'un onduleur cascade en pont H cinq niveaux

La figure 3.27 montre les quatre porteuses placées selon la méthode PS et le signal de référence. Nous avons aussi montré juste les signaux de commandes envoyés aux deux premiers interrupteurs de l'onduleur cascadié en H cinq niveaux.

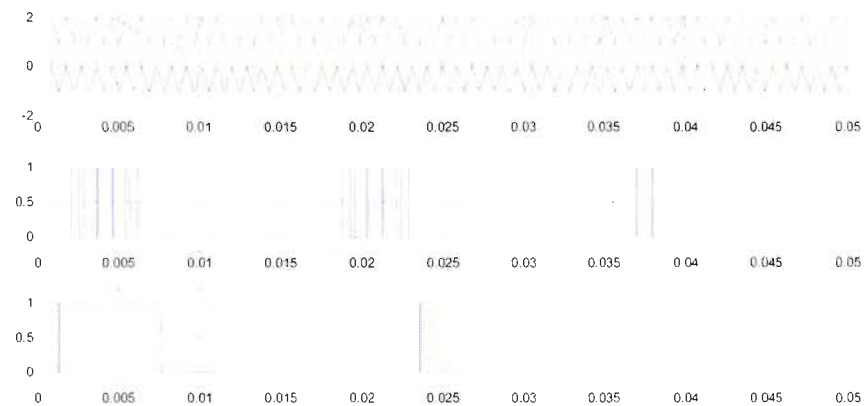


Figure 3.27 : Signaux de commande MLI d'un onduleur cascade en pont H cinq niveaux

La commande de l'onduleur NPC à cinq niveaux est exactement la même chose, juste la position des interrupteurs qui changent. Ce qui implique un changement de l'ordre d'envoi des signaux des gâchettes des interrupteurs.

3.4 CONCLUSION

L'analyse des différentes topologies de STATCOM montre que les onduleurs multiniveaux possèdent beaucoup d'avantages sur l'onduleur traditionnel à deux niveaux. Il en ressort aussi que : les onduleurs à cellules cascadiées paraissent être la solution multiniveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. Mais son exigence d'isoler l'alimentation de chaque pont en 'H' compromet son avantage sur l'onduleur NPC. En effet, pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires [9,11].

Certes les onduleurs à cinq niveaux de tensions donnent des formes d'onde plus propres que celles pour les convertisseurs à trois niveaux. Cependant, cette différence est vraiment minime car déjà avec les onduleurs à trois niveaux nous avons des signaux de qualités, avec moins de composants électroniques (donc coût moindre), et facilité de commande et surtout que la tension simple du convertisseur à cinq niveaux est identique à celle composée pour la structure à trois niveaux. Les structures à trois niveaux de tensions seront un bon compromis entre qualité et coût.

Ainsi, le convertisseur le mieux adapté pour notre application est le NPC à trois niveaux.

Chapitre 4 - Analyse du transfert de puissance du système : onduleur NPC trois niveaux, réseau électrique et charge

Les chapitres précédents nous ont permis de montrer que la technologie de STATCOM utilisant les structures d'onduleurs NPC à trois niveaux est la mieux adaptée pour notre application. Ainsi, pour la suite, le convertisseur NPC à trois niveaux sera utilisé comme STATCOM pour nos simulations

Dans ce chapitre, tout d'abord, nous faisons une analyse théorique de la compensation de la puissance réactive par un STATCOM (NPC) pour une charge locale connectée à un réseau électrique, ensuite nous présentons un algorithme de commande en boucle fermée de l'onduleur du STATCOM de façon à fournir, à une charge connectée à un réseau, les puissances active et réactive désirées. Enfin nous présentons une démo de Matlab/Simulink/SimPowerSystems où la charge est remplacée par un parc éolien à vitesse fixe, tout en gardant autant que possible les mêmes conditions de simulation que précédemment.

4.1 Analyse théorique de la compensation de la puissance réactive

La figure 4.1 illustre le schéma synoptique d'un système d'interconnexion d'une source de tension sur le réseau électrique en vue d'une compensation de puissance réactive.

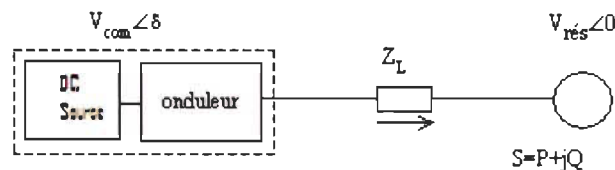


Figure 4.1 : Diagramme équivalent du système de compensation de puissance réactive [16]

Les puissances actives (P) et réactive (Q) fournies au réseau par la source continue (condensateur) peuvent être exprimées par [16]:

$$P = V_{rés} \left[\frac{R_L (V_{rés} - V_{com} \cos \delta) + X_L V_{com} \sin \delta}{R_L^2 + X_L^2} \right] \quad (4.1)$$

$$Q = V_{rés} \left[\frac{X_L (V_{rés} - V_{com} \cos \delta) - R_L V_{com} \sin \delta}{R_L^2 + X_L^2} \right] \quad (4.2)$$

Où

S = Puissance apparente (VA)

$V_{rés}$ = Tension du réseau (V)

V_{com} = Tension de sortie de l'onduleur (V)

Z_L = Impédance de ligne (regroupe les impédances des deux sources) (Ω)

R_L = Résistance de ligne (regroupe les résistances des deux sources) (Ω)

X_L = Réactance de ligne (regroupe les réactances des deux sources) (Ω)

δ = Angle de charge (degrés)

En négligeant la résistance de ligne par rapport à la réactance de ligne les deux équations (4.1) et (4.2) deviennent [17], [16]:

$$P = \frac{V_{rés} V_{com}}{X_L} \sin \delta \quad (4.3)$$

$$Q = \frac{V_{rés} (V_{rés} - V_{com} \cos \delta)}{X_L} \quad (4.4)$$

À travers ces équations, on observe qu'on peut bien varier les puissances réactive et active fournies au réseau en variant soit l'amplitude de la tension V_{com} ou soit l'angle de charge δ ou soit la réactance de ligne X_L . Nous procédons à des simulations pour vérifier l'influence de ces paramètres sur le transfert de puissance de la source au réseau.

Pour plus de cohérence dans ce chapitre, les valeurs des paramètres de simulation ont été prises en tenant compte de celles utilisées par la démo présentée à la fin du présent chapitre.

4.1.1 Influence de V_{com} et de l'angle δ sur les puissances

La figure 4.2 montre le schéma de simulation du système dans l'environnement Simulink/SimPowerSystems. Dans notre simulation, nous avons considéré que la réactance de ligne X_L est connue et est constante. Le modèle d'onduleur est toujours le NPC à trois niveaux développé.

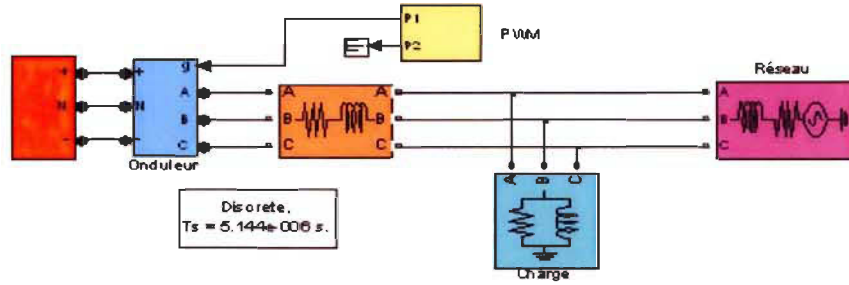


Figure 4.2 : Schéma du modèle de simulation dans Simulink/SimPowerSystems

- Réseau

Puissance de court circuit : $P_{sc} = 100 \text{ MVA}$

Ratio $(X/R) = 7$

Tension de base (ligne-ligne): $V_{base} = 25 \text{ kV (rms)}$

À partir de ces données, on peut déduire les valeurs de l'inductance et de la résistance équivalentes :

$$L = \frac{(V_{base})^2}{P_{sc}} \times \frac{1}{2\pi f} \quad (4.5)$$

$$L = 16.58 \text{ mH}$$

$$R = \frac{X}{(X/R)} = \frac{2\pi f L}{(X/R)} \quad (4.6)$$

$$R = 892.5m\Omega$$

- Charge

Puissance apparente $S = 9MVA$

Facteur de puissance FP de 85%, donc

Puissance active $P = 7.65MW$

Puissance réactive $Q = 4.74Mvars$

- Onduleur

Considérons à la sortie de l'onduleur une impédance d'inductance et de résistance équivalente à celles du réseau : $L = 16.58mH$ et $R = 892.5m\Omega$.

Choisir l'indice de modulation du générateur PWM de façon à obtenir une tension ligne-ligne de sortie de 25kV (rms). Le tableau 4.1 regroupe les résultats de simulation.

À travers le tableau 4.1, on constate qu'en augmentant l'amplitude de la tension V_{com} par rapport à l'amplitude de la tension du réseau $V_{rés}$, il se produit un transfert de puissances active et réactive de l'onduleur vers la charge; et en diminuant l'amplitude de la tension V_{com} par rapport à l'amplitude de la tension du réseau $V_{rés}$, le transfert de la puissance se fait du réseau à la charge. Cependant, la variation de la puissance active est plus importante en fonction de V_{com} . Par ailleurs en jouant sur l'angle de charge δ tout en maintenant les deux tensions égales, il se passe un transfert de puissances du compensateur vers la charge ou du réseau vers celui-ci, selon que l'angle δ est positif ou négatif; cependant c'est la puissance active qui est plus influencée dans ce cas. Ces résultats sont d'ailleurs démontrés dans l'article [18]. A travers ce même article, on démontre qu'on ne peut pas réaliser en pratique la commande des puissances active et réactive à partir des équations couplées (4.3) et (4.4), étant donné que la réactance de ligne X_L n'est pas connue de façon précise et qu'elle peut changer en fonction de l'opération du système de puissance. Une meilleure façon de régler ce problème consiste

à découpler les deux équations et de faire une commande de flux des puissances qui ne nécessite pas la connaissance de la réactance équivalente X_L .

Tableau 4-1: Résultats de simulation de l'influence de V_{com} et de l'angle δ sur les puissances

Phase	Tension du réseau	Tension de l'onduleur	Puissances de la charge		Puissances de l'onduleur			Puissances du réseau	
Degrés	V_{rs} (kV)	V_{com} (kV)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	%d'augmentation de Q	P (MW)	Q (Mvar)
0	25.5	26	7.95	4.93	4.76	7.44	43.62	3.19	-2.5
0	25.26	25.5	7.79	4.83	4.49	6.3	21.62	3.3	-1.49
0	25	25	7.64	4.74	4.22	5.18	0	3.41	-0.44
0	25	24.5	7.48	4.63	3.96	4.08	-21.35	3.52	0.53
0	25	24	7.32	4.54	3.7	3	-42.08	3.62	1.52
0	25	23.5	7.17	4.44	3.45	1.95	-62.35	3.72	2.49
0	25	23	7.02	4.35	3.2	0.92	-82.32	3.82	3.43
-1	25	25	7.63	4.74	5.09	5.02		2.54	-0.3
-3	25	25	7.63	4.74	6.84	4.72		0.79	0.02
-5	25	25	7.62	4.73	8.57	4.4		-0.95	0.32
1	25	25	7.64	4.74	3.35	5.34		4.29	-0.6
2	25	25	7.63	4.74	2.47	5.5		5.16	-0.75
3	25	25	7.63	4.74	1.6	5.65		6.03	-0.91

4.1.2 Influence de l'inductance de couplage sur les puissances fournies par l'onduleur.

La figure 4.3 illustre le schéma de simulation du système dans l'environnement Simulink/SimPowerSystems. Dans cette simulation, nous allons varier la valeur de l'inductance de couplage, et pour chaque valeur d'inductance donnée, nous varions la valeur de la tension de sortie de l'onduleur pour voir l'influence sur les puissances réactive et active fournies à la charge connectée entre les deux sources.

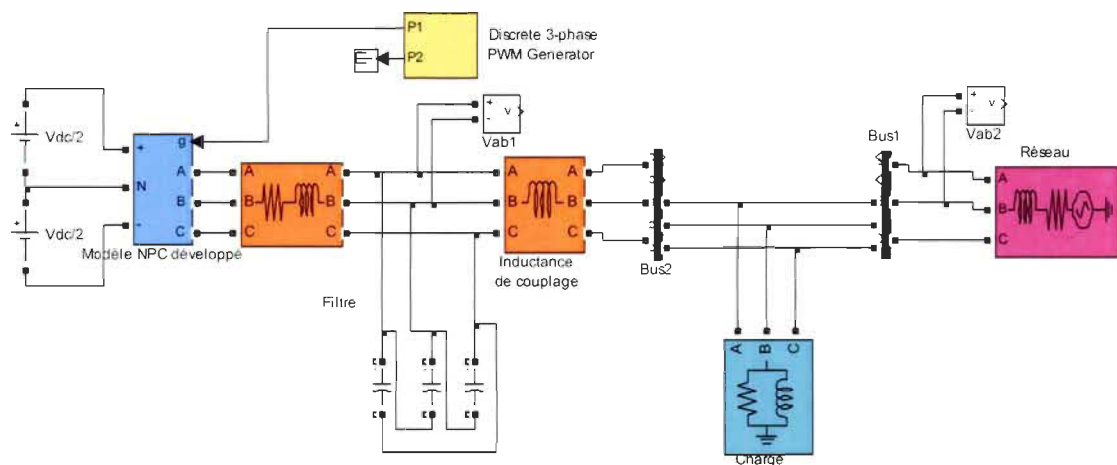


Figure 4.3 : Schéma du modèle de simulation dans Simulink/SimPowerSystems

- Réseau

Puissance de court circuit : $P_{sc} = 100 \text{ MVA}$

Ratio (X/R) = 7

Tension de base (ligne-ligne): $V_{base} = 25 \text{ kV (rms)}$

À partir de ces données, on peut déduire les valeurs de l'inductance et de la résistance équivalentes des équations.

De l'équation (4.5) nous obtenons l'inductance équivalente $L = 16.58 \text{ mH}$ et de l'équation (4.6) nous obtenons la résistance équivalente $R = 892.5 \text{ m}\Omega$.

- Charge

Puissance apparente de $S = 9\text{MVA}$

Facteur de puissance FP de 85%, donc

Puissance active $P = 7.65\text{MW}$

Puissance réactive $Q = 4.74\text{MVar}$

- Onduleur

Considérons à la sortie de l'onduleur une impédance d'inductance et de résistance équivalentes à celles du réseau servant de filtre: $L = 16.58\text{mH}$ et $R = 892.5\text{m}\Omega$.

Ajoutons ensuite une inductance de couplage entre l'onduleur et la charge. Les résultats de simulation, en variant la valeur de l'inductance de couplage, sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-2: Résultats de simulation de l'influence de l'inductance de couplage sur les puissances

Inductance de couplage	Tension du réseau	Tension de l'onduleur	Puissances de la charge		Puissances de l'onduleur		Puissances du réseau	
L (mH)	$V_{r\acute{e}n}$ (kV)	V_{com} (kV)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	22.14	22.17	5.97	3.70	5.26	2.79	0.7	0.91
	22.56	22.62	6.2	3.85	5.52	3.08	0.7	0.77
	23.02	23.08	6.47	4.01	5.78	3.4	0.69	0.62
	24.82	24.9	7.52	4.66	6.87	4.69	0.64	-0.02
	25.72	25.81	8.08	5.01	7.46	5.40	0.61	-3.89
	29.33	29.45	10.5	6.52	10.04	8.61	0.46	-2.01
3	22.20	22.21	5.92	3.67	5.15	2.75	0.76	0.92
	22.47	22.67	6.16	3.82	5.40	3.03	0.75	0.79
	22.91	23.13	6.41	3.98	5.66	3.33	0.75	0.65
	24.69	24.95	7.43	4.62	6.72	4.61	0.71	0.02
	25.57	25.87	7.98	4.95	7.3	6.3	0.68	-0.34
	29.13	29.53	10.36	6.43	9.80	8.43	0.55	-2

5	21.9	22.2	5.87	3.64	5.05	2.70	0.82	0.94
	22.37	22.73	6.11	3.79	5.29	2.98	0.81	0.81
	22.8	23.19	6.35	3.94	5.54	3.27	0.8	0.69
	24.55	25.03	7.36	4.57	6.58	4.52	0.77	0.05
	25.43	25.95	7.9	7.14	5.2	5.2	0.75	-0.29
	28.83	29.63	10.2	6.34	9.56	8.27	0.6	-1.92
7	21.81	208	5.83	3.61	4.95	2.66	0.87	0.96
	22.27	22.81	6.06	3.76	5.19	2.93	0.87	0.83
	22.7	23.27	6.29	3.90	5.43	3.22	0.86	0.68
	24.43	25.12	7.28	4.52	6.45	4.44	0.84	0.08
	25.29	26.04	7.81	4.84	6.98	5.1	0.82	-0.25
	28.73	29.74	10.09	6.25	9.37	8.1	0.72	-1.84

Commentaires: À travers ce tableau, on constate qu'en augmentant la valeur de l'inductance de couplage, la puissance active fournie à la charge par l'onduleur diminue tandis que la puissance réactive augmente. Cependant, la variation de ces puissances n'est pas linéaire à la variation de l'inductance de couplage, car cette dernière crée un déphasage entre les deux tensions V_{res} et V_{com} ; or ce déphasage intervient dans le calcul des puissances. Par ailleurs, on remarque que, plus la valeur de l'inductance de couplage est élevée plus la tension à la sortie de l'onduleur doit être élevée pour compenser une puissance réactive donnée.

4.1.3 Influence de V_{com} sur les puissances et la chute de tension au PCC

Gardons les mêmes paramètres de simulations précédentes, nous ajoutons une ligne de transport de 25km entre le réseau et l'onduleur. Ce qui donnera lieu à des chutes de tension au point commun de connexion(PCC).

L'objectif alors de cette partie est d'étudier l'influence du transfert de la puissance du système aux chutes de tension au point commun de connexion.

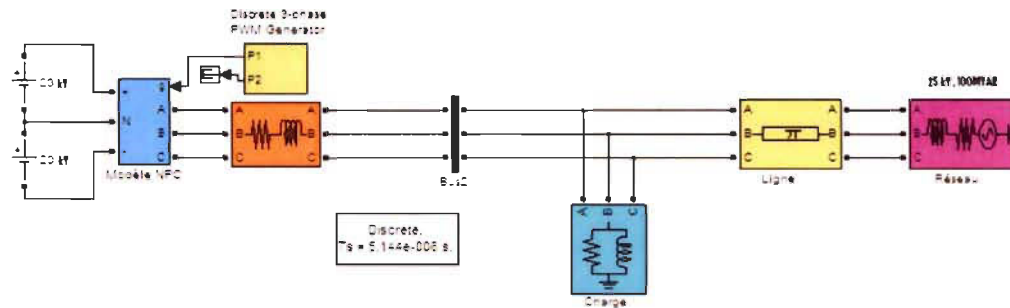


Figure 4.4 : Schéma du modèle de simulation dans Simulink/SimPowerSystems

- Tension d'entrée $V_{DC}=20$ kV, dans ce cas, nous aurons une tension $V_{com}=22.83$ kV, le transfert de la puissance se fera théoriquement du réseau vers l'onduleur car la valeur de la tension du réseau $V_{réseau}$ est plus grande que celle de l'onduleur V_{com} .

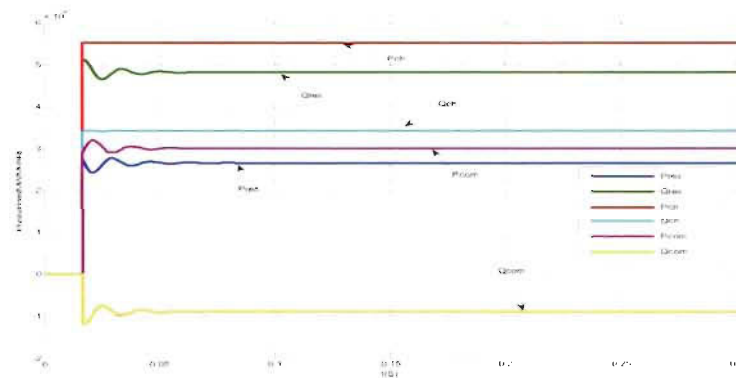


Figure 4.5 : Évolution des puissances actives et réactives du système cas 1

Commentaire : Le réseau fournit dans ce cas la totalité de la puissance réactive à la charge et même une partie de la puissance réactive du réseau est consommée par l'onduleur. Le transfert de puissance se fait de l'onduleur vers la charge. Néanmoins une partie de la puissance active de la charge provient de l'onduleur. La tension au point commun de connexion est de 21.3 kV.

- Tension d'entrée $V_{DC}=22$ kV, dans ce cas, nous aurons une tension $V_{com}=25.11$ kV, le transfert de la puissance se fera théoriquement du réseau vers l'onduleur car la valeur

de la tension du réseau $V_{réseau}$ est plus grande que celle de l'onduleur V_{com} .

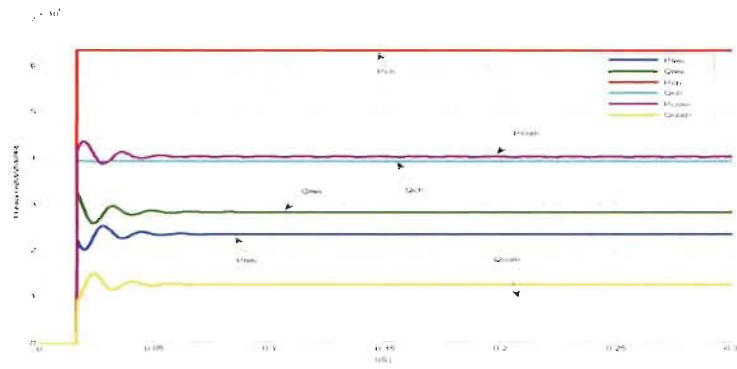


Figure 4.6 : Évolution des puissances actives et réactives du système cas 2

Commentaire : Nous remarquons une augmentation des puissances de la charge, nous assistons à une contribution équilibrée de puissance de la part de l'onduleur et du réseau à la charge. Ceci s'explique par la quasi-égalité de la tension ($V_{com}=25.11\text{kV}$) et de la tension ($V_{réseau}=25\text{kV}$). Nous assistons à une augmentation de la tension au point commun de connexion (21.3kV) par rapport au cas précédent, ceci est dû à l'apport d'une partie de la puissance réactive de la charge par l'onduleur, ce qui diminue la contribution du réseau en puissance réactive.

- Tension d'entrée $V_{DC}=25\text{kV}$, dans ce cas, nous aurons une tension $V_{com}=28.5\text{kV}$, le transfert de la puissance se fera théoriquement de l'onduleur vers le réseau car la valeur de la tension de l'onduleur V_{com} est plus grande que celle du réseau $V_{réseau}$.

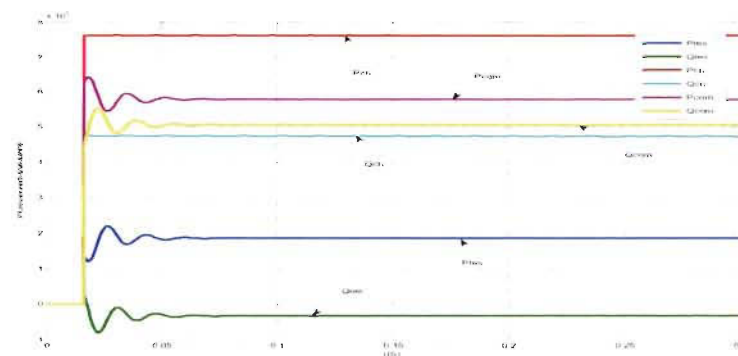


Figure 4.7 : Évolution des puissances actives et réactives du système cas 3

Commentaire : L'onduleur fournit dans ce cas la totalité de la puissance réactive à la charge. La tension au point commun de connexion est de 25kV, elle a augmenté par rapport aux cas précédents. Une partie de la puissance réactive produite par l'onduleur est injectée dans le réseau.

Le tableau 4.3 regroupe les résultats de simulation obtenus.

Tableau 4-3: Résultats de simulation de l'influence de V_{com} sur les puissances

Tension V_{dc}	Tension réseau	Tension de l'onduleur	Puissance de la charge		Puissance de l'onduleur		Puissance du réseau	
V_{DC} (kV)	$V_{rés}$ (kV)	V_{com} (kV)	P (MW)	Q (Mvar)	P M(W)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
20	25	22.83	5.53	3.44	3.02	-0.89	2.67	4.82
22	25	25.11	6.33	3.93	1.27	4.04	2.35	2.83
25	25	28.5	7.61	4.72	5.77	5.03	1.85	-0.34

Commentaire: à travers ce tableau, nous constatons plus le réseau fourni de la puissance réactive plus sont élevées les chutes de tensions au point commun de connexion. Ainsi, un contrôle adéquat de la puissance réactive permet de stabiliser la tension au point de connexion commun, soit en injectant ou en absorbant de la puissance réactive du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, entre autre le compensateur statique STATCOM.

L'objectif du point suivant est de faire de la compensation de la puissance réactive via un STATCOM pour une charge locale connectée à un réseau

4.2 Choix de l'algorithme de commande de l'onduleur

La commande en tension d'un onduleur à source de tension (VCVSI : Voltage Controlled Voltage Source Inverter) utilise l'amplitude et la phase de la tension de sortie de l'onduleur par rapport à la tension du réseau pour commander le flux de tension [19]. En VCVSI, le courant désiré circulant dans l'inductance de couplage peut être produit en commandant la tension aux bornes de celle-ci. Ainsi, l'écoulement de puissances dans le

cas d'un STATCOM est commandé en ajustant l'amplitude et la phase de la tension de sortie de l'onduleur par rapport à la tension du réseau.

Quant à la commande en courant d'un onduleur de source de tension (CCVSI : Current Controlled Voltage Source Inverter), ce sont les instants de commutation qui produisent l'écoulement de courant désiré dans l'inductance de filtrage de l'onduleur, en utilisant les courants instantanés de rétroaction [19]. Par conséquent, la commande de l'écoulement de puissances est liée aux instants de commutation.

On note que les puissances active et réactive sont commandées indépendamment en CCVSI, alors qu'elles sont couplées en VCVSI ; c'est un des grands avantages de la CCVSI [19]. Par ailleurs, la commande CCVSI est plus rapide en réponse, comparée à la VCVSI.

Nous pensons qu'en commandant indépendamment les puissances active et réactive, nous aurons plus de flexibilité dans la commande d'écoulement de puissances. Ainsi, nous décidons de retenir une commande en courant pour la commande de l'onduleur de notre STATCOM.

4.2.1 L'algorithme de commande CCVSI

L'objectif principal de cet algorithme consiste à commander l'onduleur du STATCOM de façon à fournir, à une charge connectée à un réseau local, les puissances active et réactive désirées. L'algorithme de commande proposé dans ce travail est basé sur la théorie de puissance réactive instantanée ("the instantaneous reactive power theory") développée dans [20], [21]. Les tensions de phase du réseau (v_{AN} , v_{BN} , v_{CN}) et les courants de la charge (i_{LA} , i_{LB} , i_{LC}), sont transformés de coordonnées $a-b-c$ en coordonnées $\alpha-\beta$ par les équations (4.7) et (4.8) respectivement :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{LA} \\ i_{LB} \\ i_{LC} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Les puissances instantanées active p et réactive q sont obtenues par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

À partir des valeurs instantanées de puissances active et réactive de la charge, nous pouvons définir les puissances de références c'est-à-dire les puissances désirées que doit fournir l'onduleur. Dans notre cas nous proposons de définir ces puissances de références (p^* , q^*) en multipliant chacune des deux puissances par une constante comme suit :

$$\begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

où k_1, k_2 sont des facteurs correspondant respectivement au pourcentage de puissance active et réactive de la charge qu'on voudrait compenser.

On calcule les courants de références en coordonnées $\alpha - \beta$ ($i_{c\alpha}, i_{c\beta}$) avec l'équation (4.11) :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Et en coordonnées $a - b - c$, les courants de références ($i_{CA}^*, i_{CB}^*, i_{CC}^*$) seront :

$$\begin{bmatrix} i_{CA}^* \\ i_{CB}^* \\ i_{CC}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Finalement les courants de références sont comparées aux courants à la sortie de l'onduleur (i_{CA}, i_{CB}, i_{CC}) pour générer les signaux de commande de l'onduleur grâce à une commande de courant (hystérésis) dont le diagramme est décrit sur la figure 4.8.

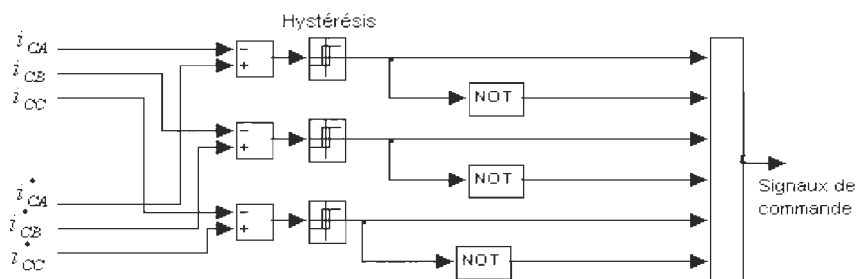


Figure 4.8 : Diagramme de la commande de courant

La figure 4.9 illustre le schéma synoptique du système avec l'algorithme de commande. Le système est constitué d'une source CC, l'onduleur triphasé, une inductance de couplage (filtre), le réseau triphasé, une charge RL et les blocs de commande.

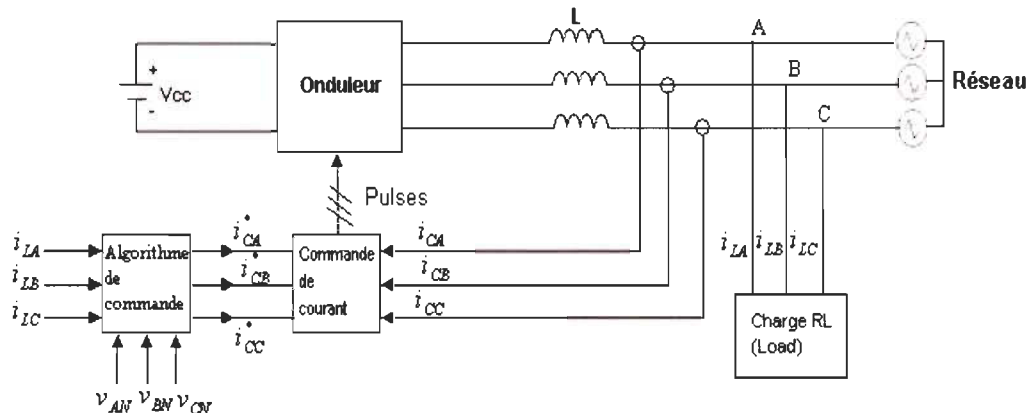


Figure 4.9 : Schéma synoptique du système STATCOM-Charge-Réseau

4.2.2 Simulation du système complet dans l'environnement Matlab Simulink /SimPowerSystems

Nous procédons à la simulation du système dont le schéma synoptique est présenté à la figure 4.9. L'algorithme de commande est programmé avec les blocs de Simulink, et la

figure 4.10 représente le schéma de simulation du système dans l'environnement Simulink/SimPowerSystems.

- Réseau

Puissance de court circuit : $P_{sc} = 100 \text{ MVA}$

Ratio (X/R) = 7

Tension de base (ligne-ligne): $V_{base} = 25 \text{ kV (rms)}$

- Charge RL

Puissance apparente $S = 9 \text{ MVA}$

Facteur de puissance FP de 85%, donc

Puissance active $P = 7.65 \text{ MW}$

Puissance réactive $Q = 4.74 \text{ Mvar}$

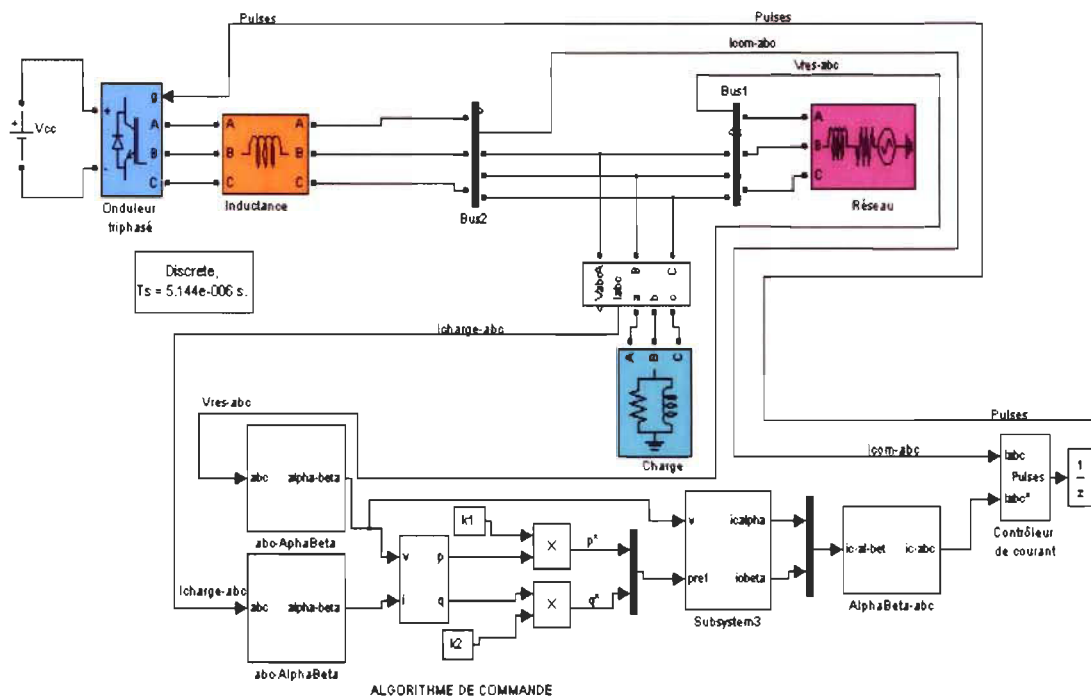


Figure 4.10 : Schéma de simulation du système

- Onduleur

Considérons à la sortie de l'onduleur une inductance de $L = 43.38mH$ servant de filtre.

Pour fins de simulation, nous proposons le cas de compenser les 100% de la puissance réactive et les 20% de la puissance active de la charge locale par le STATCOM, donc les facteurs k_1 et k_2 seront respectivement de 0.2 et 1.

Les résultats de simulation pour un temps de 0.3 seconde sont présentés sur les figures 4.11 à 4.14. La figure 4.13 représente les courants de références obtenues à partir de l'algorithme de commande. La comparaison de ces courants avec les courants générés par l'onduleur (figure 4.14) permet d'avoir les signaux de commande grâce au contrôleur de courant.

Lorsque la charge est connectée au réseau sans la présence du STATCOM, les puissances active et réactive de celle-ci sont fournies par le réseau, c'est ce qui explique que les puissances actives du réseau et de la charge sont superposées ; de même que les puissances réactives voir figure 4.11.

En connectant le STATCOM, il fournit la totalité de la puissance réactive et une partie de la puissance active demandées par la charge, en conformité avec les facteurs k_1 et k_2 choisis. Ainsi, les puissances réactives de la charge et du compensateur (STATCOM) sont superposées comme l'illustre la figure 4.12. La puissance active de la charge est donnée par le réseau et le compensateur selon des proportions bien déterminées.

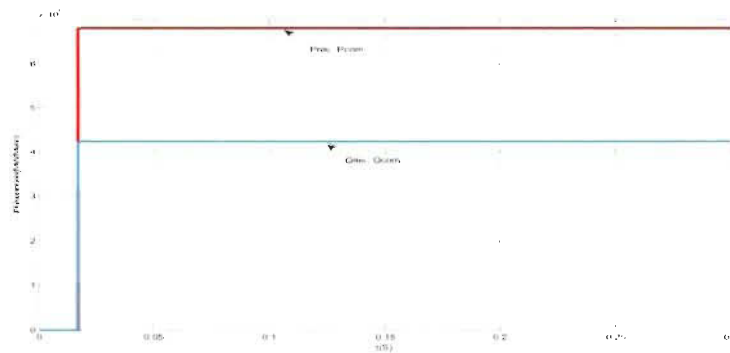


Figure 4.11 : Graphiques transfert de puissance sans STATCOM

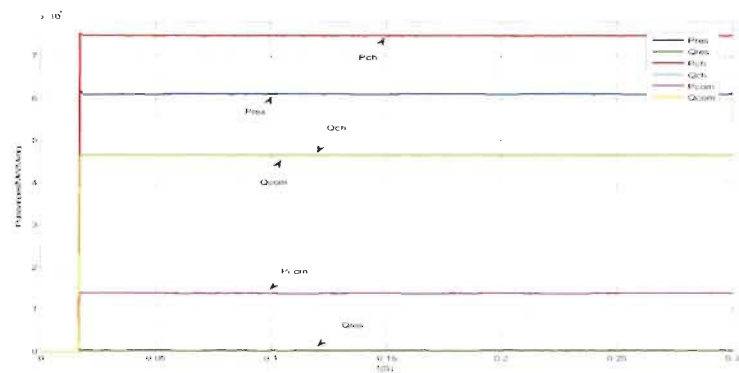


Figure 4.12 : Graphiques transfert de puissance avec STATCOM

Commentaires : Nous venons de voir qu'en simulation, l'algorithme de commande en courant de l'onduleur nous a permis de compenser la puissance réactive d'une charge locale.

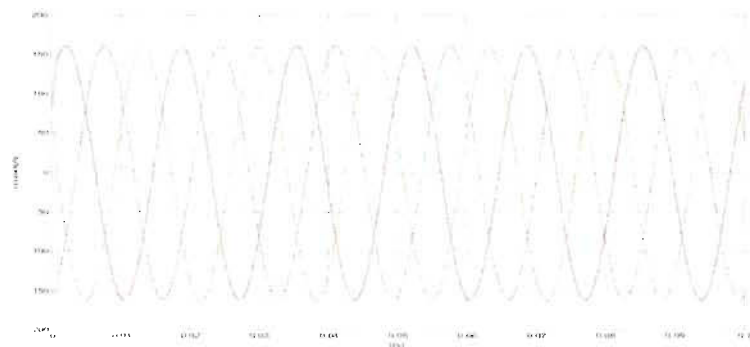


Figure 4.13 : Graphiques a) de courants de références

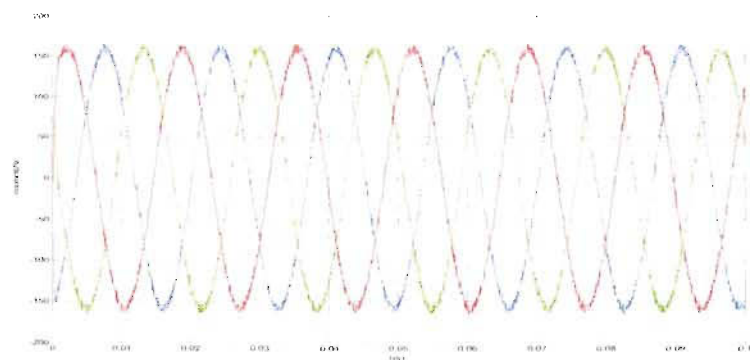


Figure 4.14 : Graphiques des courants générés par l'onduleur

4.3 Analyse des résultats de simulation d'un système STATCOM et éolienne à vitesse fixe

Pour montrer l'impact d'un STATCOM sur la tension au point de connexion commun (PCC) entre un réseau électrique et une source de distribution d'énergie électrique, nous avons cherché une démo Matlab/Simulink/SimpowerSystems. Cette démo présente une simulation d'une ferme éolienne de 9 MW, utilisant des génératrices asynchrones à cage.

4.3.1 Modélisation et description du système

La figure 4.13 montre le schéma de simulation d'un parc éolien composé de six éoliennes de 1.5MW reliées entre elles. Le parc est connecté à un réseau électrique de 125kV à travers une ligne de distribution de 25 km de long, la ligne est à une tension de 25kV connectée au réseau à travers un transformateur 125kV/25kV pour une puissance 47 MVA.

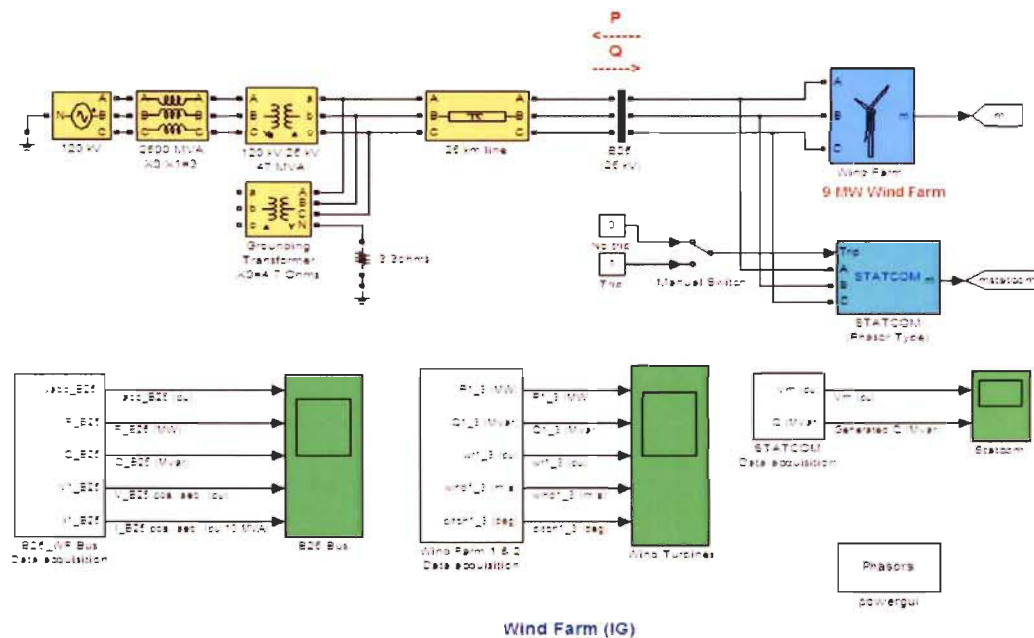


Figure 4.15 : Schéma de simulation du système parc éolien et STATCOM

L'autre composant majeur du système est le STATCOM permettant de réguler la tension au point de connexion commun entre le réseau et le parc éolien.

Ce STATCOM dont le schéma bloc est présenté à la figure 4.16 utilise le même principe de la compensation de la puissance réactive montré par les équations (4.3) et 4.4). Il est constitué d'un onduleur (dont les détails ne sont pas mentionnés) avec un condensateur du côté courant continu (cc) et une inductance de couplage du côté courant alternatif (ac), et il est connecté sur le réseau électrique. Le STATCOM régule la tension au PCC en contrôlant la quantité de puissance réactive injectée ou absorbée dans le réseau : lorsque la tension du réseau est faible ($V_1 > V_2$) le STATCOM génère de la puissance réactive (STATCOM capacitif) et lorsque la tension du réseau est élevée ($V_1 < V_2$), elle absorbe de la puissance réactive (STATCOM inductif).

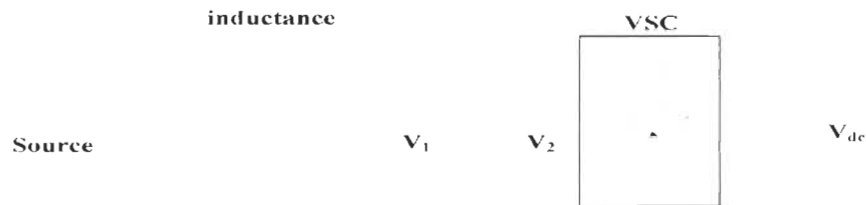


Figure 4.16 : Schéma bloc du STATCOM utilisé

Pour les simulations, il a été utilisé trois éoliennes de 1.5MW utilisant des génératrices asynchrones à cage. L'enroulement du stator est relié directement au réseau de 60Hz et le rotor est commandé par un système de pitch –control, comme le montre la figure 1.2. L'angle de calage des pales est contrôlé de telle sorte que la puissance de sortie de la génératrice est limitée à sa valeur nominale pour des vitesses de vent ne dépassant pas la vitesse nominale 9m/s. Afin de fonctionner en génératrice, la vitesse de la génératrice doit être légèrement supérieure à la vitesse synchrone. La vitesse de la génératrice varie alors approximativement entre 1 pu à vide et 1,005pu à charge nominale.

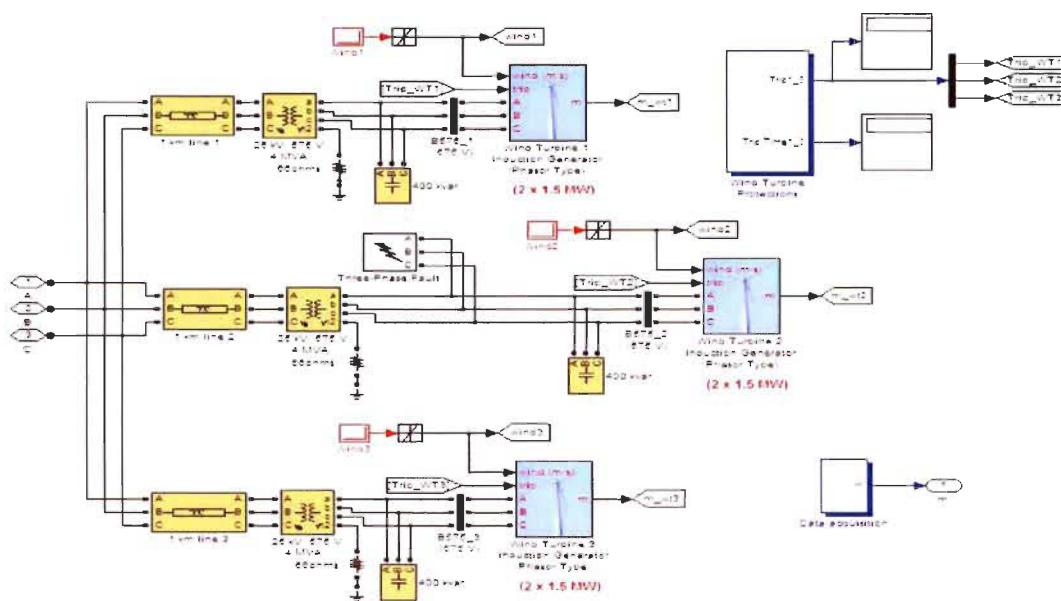


Figure 4.17 : Modèle développé du parc éolien

La puissance réactive absorbée par les génératrices éoliennes est en partie compensée par des bancs de condensateurs de 400kvar reliés à chaque paire de turbines éoliennes, comme le montre la figure 4.17. Le reste de la puissance réactive nécessaire pour maintenir la tension au PCC du bus B25 à 25kv (1pu) est fournie par un STATCOM de 3Mvar.

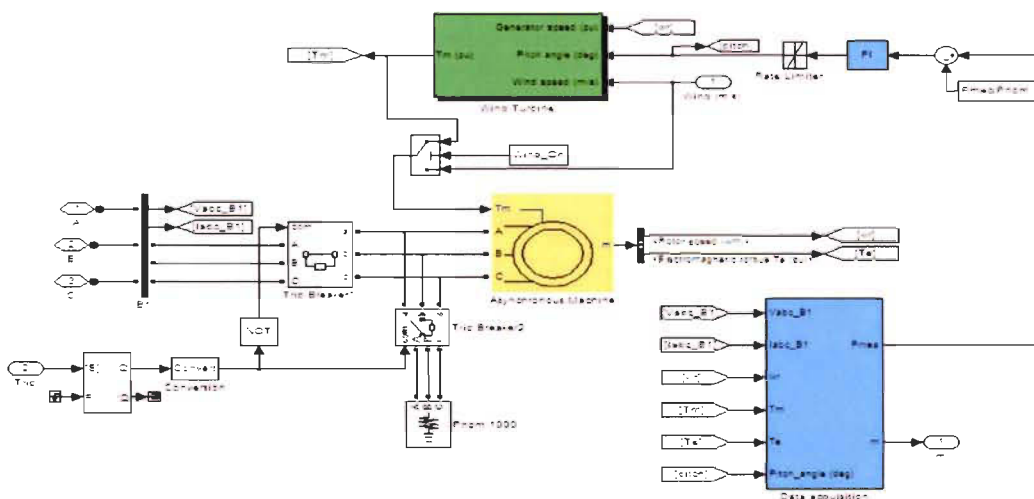


Figure 4.18 : Modèle développé d'une éolienne

4.3.2 Analyse des résultats obtenus en simulation

Au commencement, la vitesse du vent est fixée à 8 m/s, puis commençant à $t=2$ s pour la turbine éolienne 1, la vitesse du vent est ramenée à 11 m/s en 3 secondes. La même rafale du vent est appliquée à la turbine 2 et à la turbine 3, respectivement avec 2 secondes et 4 secondes de retard par rapport à la première turbine. Puis, à $t=15$ s un défaut provisoire est appliqué à la sortie de l'éolienne 2 côté basse tension (575 V).

a) Réponse du système aux variations de la vitesse du vent

Pour chaque paire de turbine éolienne, la puissance active générée commence à augmenter en douceur (avec la vitesse du vent) pour atteindre sa valeur nominale de 3 MW dans environ 8s. Au cours de cette période, la vitesse de la turbine est passée de 1.0028pu à 1.0047pu.

Au départ, l'angle calage des pales de turbine est égal à zéro degré. Lorsque la puissance de sortie supérieure à 3 MW, l'angle de calage est passé de 0° à 8° afin de mettre la puissance de sortie à sa valeur nominale.

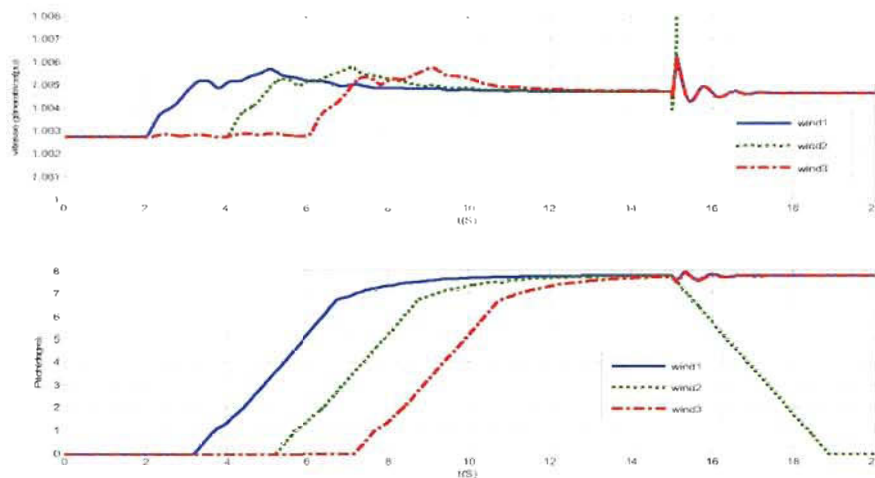


Figure 4.19 : vitesse des génératrices et angles de calage des pales des éoliennes

La puissance réactive absorbée augmente et la puissance active générée augmente. À la puissance nominale, chaque paire d'éoliennes absorbe 1,47 Mvar. Pour une vitesse du vent de 11 m / s, la puissance totale mesurée sur le bus B25 est de 9 MW,

le STATCOM maintien la tension du bus B25 à 0.984 pu en générant une puissance de 1,62 MVAR comme le montre la figure 4.21

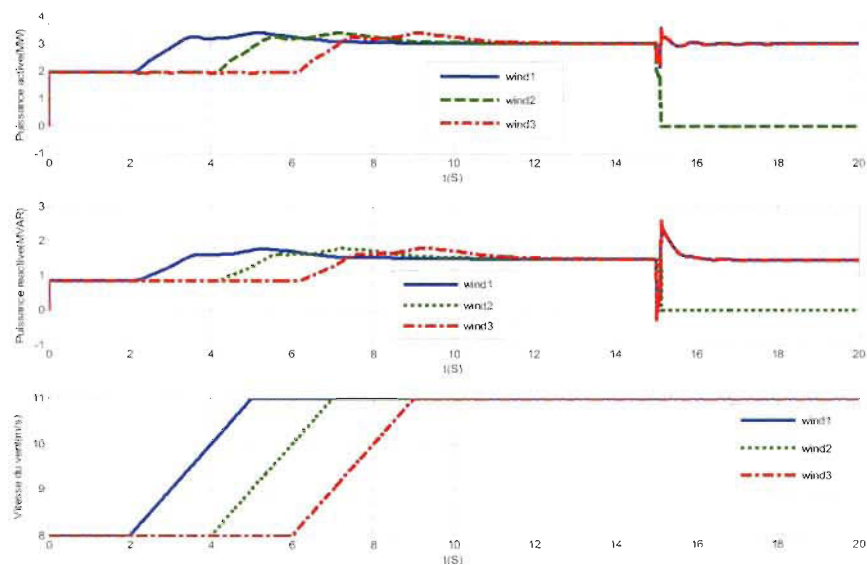


Figure 4.20 : Puissances réactives et actives et vitesses du vent

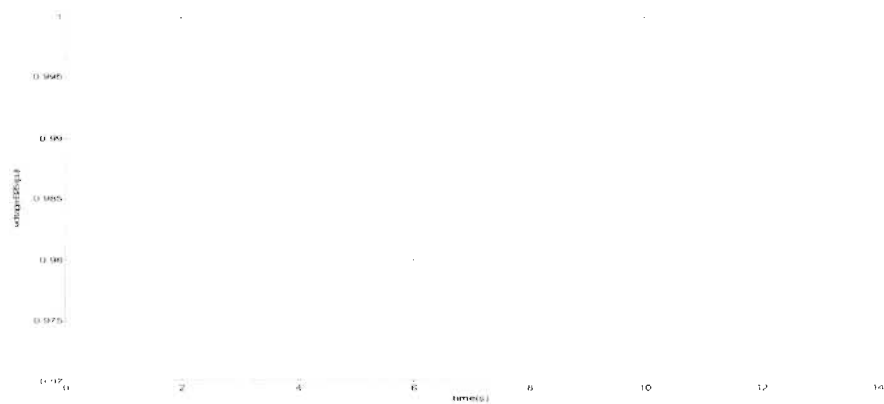


Figure 4.21 : Tension au point de connexion commun VB25

À $t=15$ s, un défaut entre phases est appliqué à la sortie de l'éolienne 2. À $t=15.11$ S le système de protection de l'éolienne 2 est activé et qui le déconnecte du système (figure 4.17), les éoliennes 1 et 3 continuent à produire de 3 MW chacune.

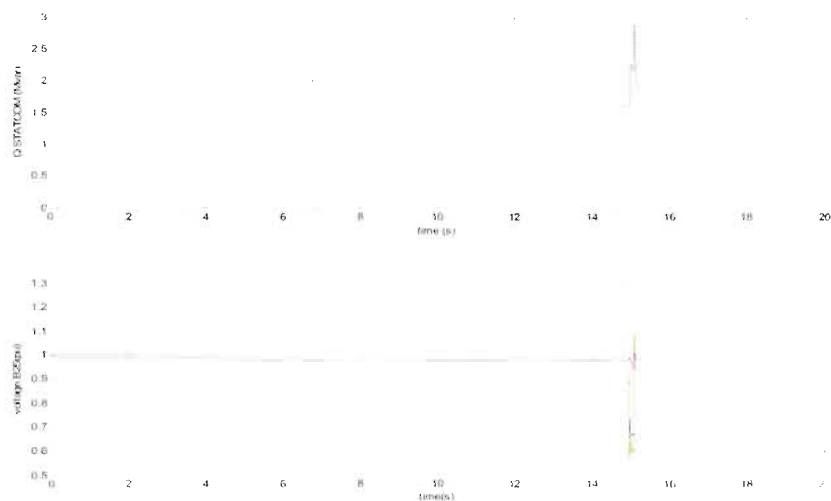


Figure 4.22 : Puissance réactive fournie par le STATCOM et tension VB25

a) Impact du STATCOM

Pour observer maintenant l'impact du STATCOM, d'abord, on ouvre le menu de bloc de défaut pour désactiver le défaut entre phases. Puis on met le STATCOM hors service en mettant le «manual switching» à la position 1. On relance la simulation.

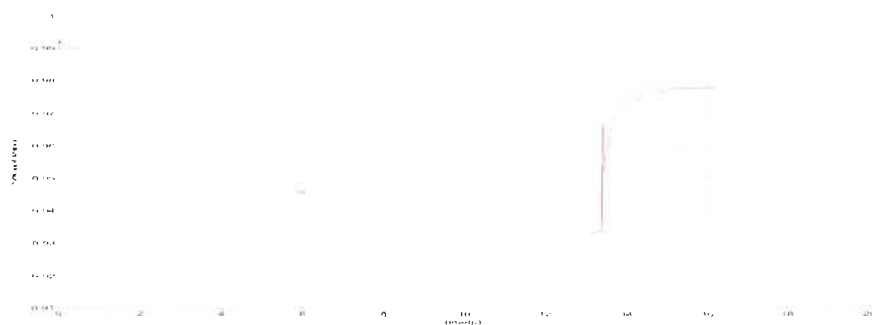


Figure 4.23 : Tension au point commun de connexion VB25

Nous remarquons qu'en raison du manque d'appui de puissance réactive, la tension du bus B25 chute maintenant à 0.91pu, comme le montre la figure 4.23, à comparer à la figure 4.21. Cet état de basse tension a comme conséquence une surcharge de la génératrice de la turbine éolienne 1. La turbine de éolienne 1 est déclenchée à $t=13.43$ s (figure 4.24).

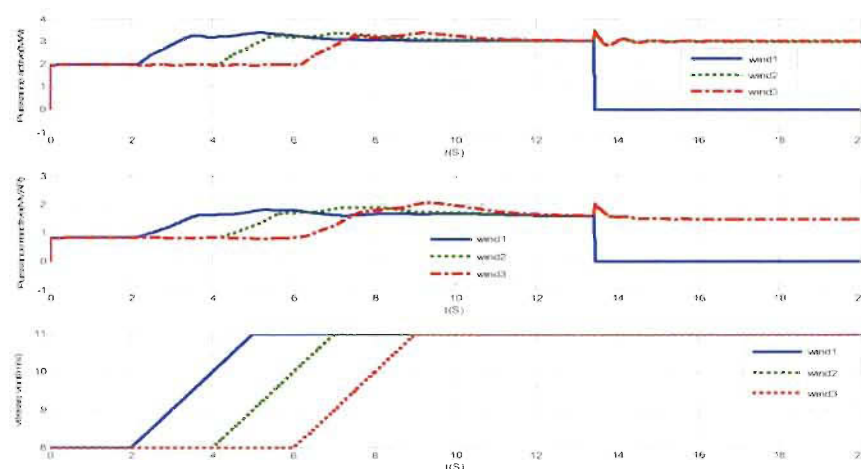


Figure 4.24 : Puissances réactives et actives et vitesses du vent

4.4 Conclusion :

À travers ce chapitre nous constatons que le transfert de la puissance dans le système dépend de plusieurs paramètres. Nous remarquons aussi que les chutes de tension au PCC dépendent fortement de la contribution en puissance réactive du réseau. Ainsi, un contrôle adéquat de la puissance réactive permet de stabiliser la tension au point de connexion commun, soit en injectant ou en absorbant de la puissance réactive du réseau.

Nous avons montré clairement l'intérêt capital d'un STATCOM dans les réseaux de distribution d'énergie. Le STATCOM avec son apport en énergie réactive permet de stabiliser une tension à une valeur relativement constante et c'est malgré un défaut dans le réseau, ce qui évitera les déconnexions suite aux déclenchements d'équipements de protection des parcs éoliens, et permettra de maintenir les éoliennes connectées au réseau même sous certaines conditions de perturbation. Ces résultats sont d'ailleurs démontrés dans l'article [4]. Dans ce même article, il a été montré par des résultats de simulation que la tension au PCC entre l'éolienne à vitesse fixe et le réseau fluctuait moins en présence d'un STATCOM qu'à son absence.

Chapitre 5 - Validation expérimentale

Dans cette partie, nous réalisons la partie pratique de notre travail. Il s'agit de réaliser la partie commande et la partie puissance de deux structures d'onduleur à trois niveaux de tensions étudiées dans les chapitres précédents. Nous limiterons notre étude à un seul bras à trois niveaux de tension pour chaque topologie de convertisseur. Ce choix se justifie en partie par la bonne représentativité de l'onduleur triphasé par un bras d'onduleur. Nous obtenons des résultats concluants avec moins de composants électroniques (donc moindre coût) et plus de facilité de réalisation.

La méthode de commande retenue aussi est la méthode à phase décalée «PS» présentée dans le chapitre 3. Ainsi, les signaux de commandes des impulsions des gâchettes des IGBT des onduleurs sont générés à travers un programme écrit en C et envoyé à l'onduleur via un Dspic tout en suivant le principe de la méthode de commande «PS».

5.1 L'onduleur cascade en pont H monophasé à trois niveaux

Nous comptons obtenir en pratique la tension de sortie de l'onduleur cascade en pont H trois niveaux présenté à la figure 2.11. La structure d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade est identique à celle d'un onduleur classique monophasé en pont complet voir figure 2.11. Nous utiliserons donc les deux bras (a et b) d'un onduleur triphasé industriel Semikron que nous commanderons par la méthode PS à travers un dspic.

L'onduleur utilisé est le Miniskiip8 triphasé de SEMIKRON, cet onduleur est composé de trois bras. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle, comme le montre la figure 5.1 (photo) et la figure 5.2 (modèle).



Figure 5.1 : Photo de l'onduleur Miniskiip8 triphasé de SEMIKRON

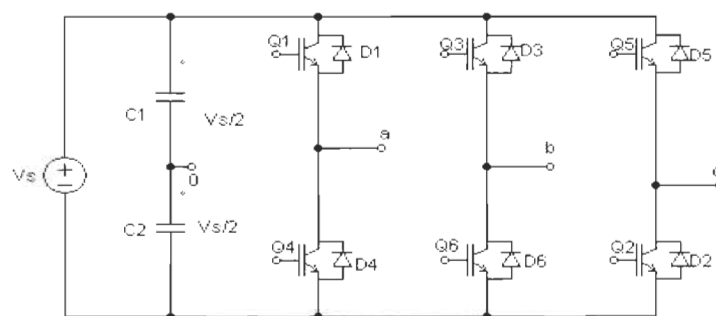


Figure 5.2 : Topologie d'un onduleur triphasé à deux niveaux

La méthode de commande utilisée est celle à phase décalée (PS). Nous programmerons la commande avec le langage C que nous envoyons dans un dsPIC33FJ128MC706 de microchip. Les quatre signaux de commande obtenus sont présentés à la figure 5.3

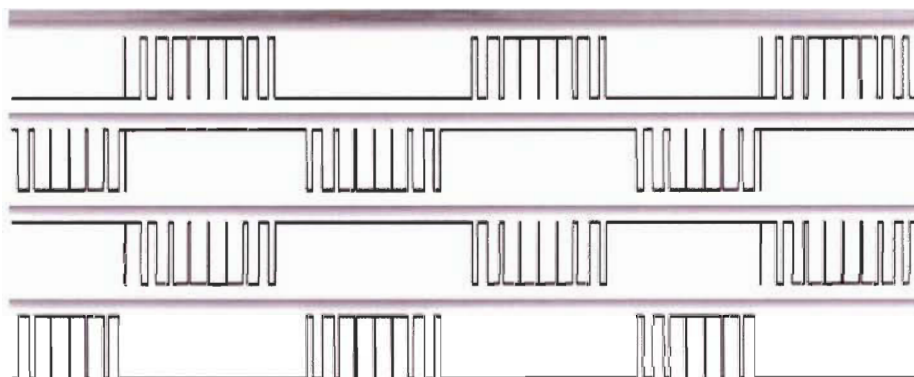


Figure 5.3 : Signaux PWM obtenus par le Dspic

Le dspic nous génère quatre signaux PWM de (0V ou 3.3V) qui ne peuvent pas être envoyés directement à l'onduleur. En effet, les grilles des IGBT de l'onduleur demandent un signal de 12V. Nous utiliserons alors un circuit qui permettra d'obtenir un signal PWM de (0V-12V), comme le montre la figure 5.4.

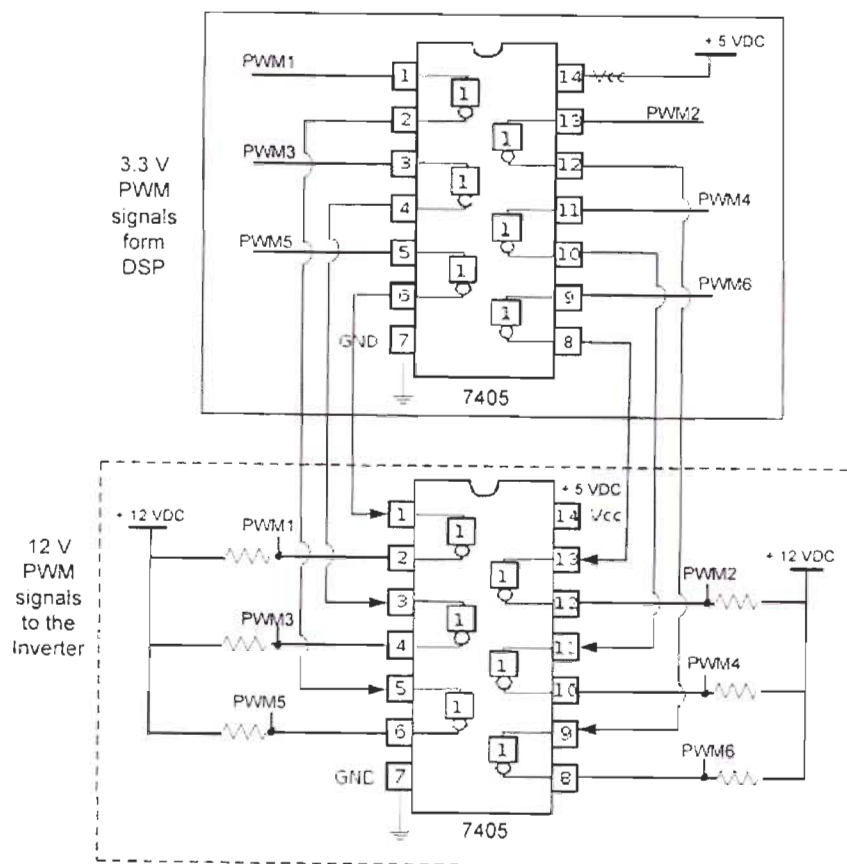


Figure 5.4 : Interface circuit PWM pour l'onduleur cascade en pont H

Les autres composants nécessaires à cette validation expérimentale sont les sources de tension, les blocs de résistance et d'inductance comme charge, l'oscilloscope, l'inductance et le condensateur pour le filtre. La photo du montage utilisée est présentée à la figure 5.6.

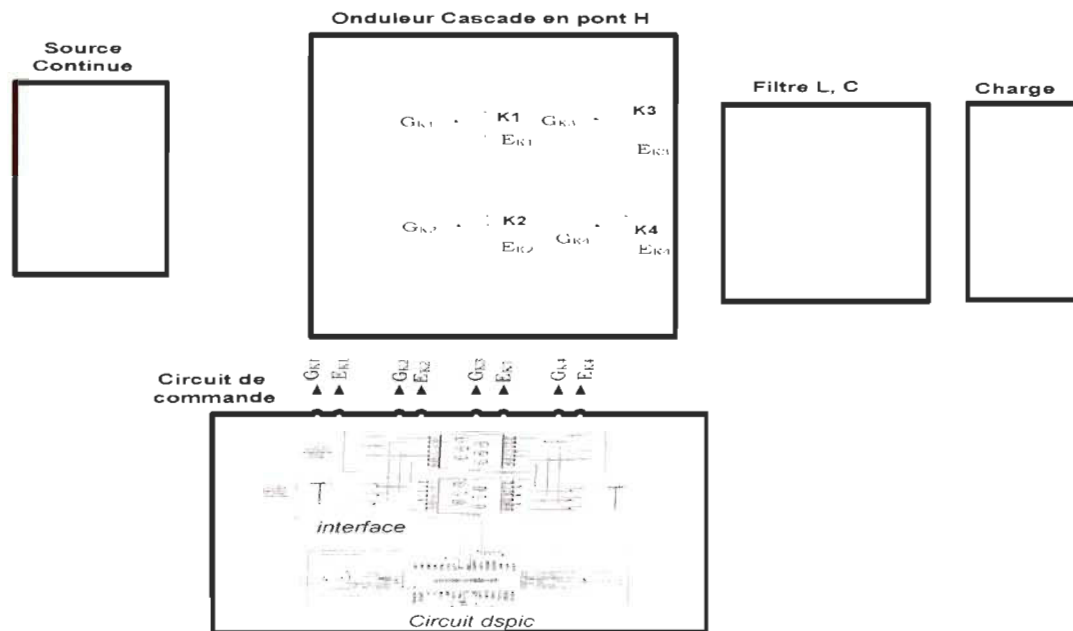


Figure 5.5 : Système global pour la validation de l'onduleur cascade en pont H

La figure 5.5 nous montre les signaux PWM pour la commande de l'onduleur .

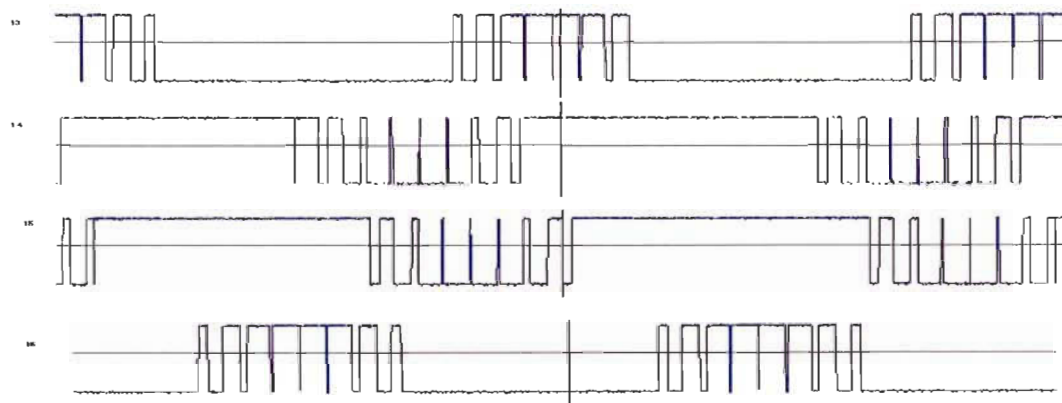


Figure 5.6 Signaux PWM obtenus après amplification

5.1.1 Résultats expérimentaux pour l'onduleur cascade en pont H

Pour une tension d'entrée $E = 40V$ et une charge purement résistive : $R = 60\Omega$, nous obtenons à l'oscilloscope la forme d'onde de la figure 5.7. La forme d'onde obtenue correspond à celle présentée dans la partie théorique du chapitre 2.

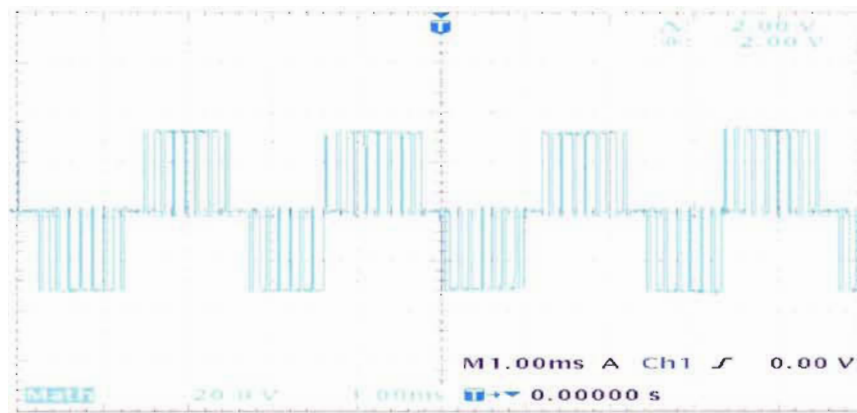


Figure 5.7 : Forme d'onde de la tension de charge expérimentale pour le pont H

Pour la suite de la validation, nous choisirons une tension d'entrée $E = 40V$, et nous varions juste notre charge. Nous avons aussi repris des simulations pour les mêmes conditions expérimentales pour mieux analyser nos résultats théoriques et pratiques.

a) Charge purement résistive :

La figure 5.8 montre le schéma réalisé en pratique et en simulation de l'onduleur cascadié en pont H avec charge purement résistive.

La figure 5.9 et la figure 5.10 présentent les formes d'onde respectivement obtenues expérimentalement et par simulation.

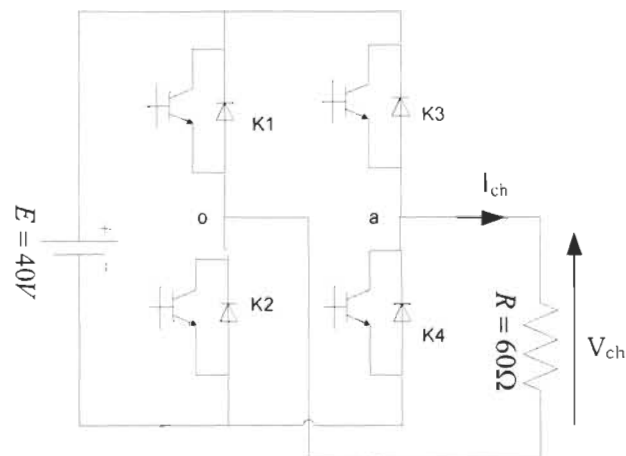


Figure 5.8 : Schéma réalisé avec charge résistive $R = 60\Omega$ pour le pont H

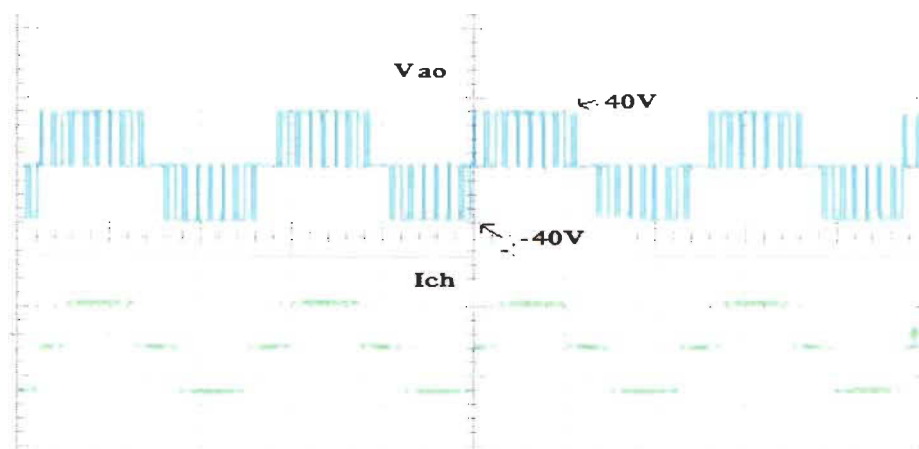


Figure 5.9 : Forme d'onde de la tension et du courant de charge expérimentaux pour le pont H

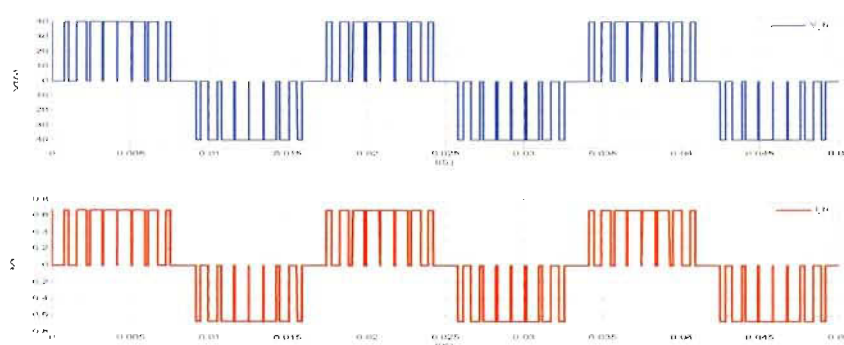


Figure 5.10 : Forme d'onde de la tension et du courant de charge simulés pour le pont H

Commentaire : Les formes d'onde de la tension et du courant de charge obtenues expérimentalement correspondent à celles simulées mais aussi à celles présentées dans la partie théorique du chapitre 2. La tension et le courant ont la même allure et sont en phases.

a) Charge résistive et inductive:

Nous ajoutons une inductance en série avec la résistance de charge comme le montre la figure 5.11, et faisons la même étude que précédemment.

La figure 5.12 et la figure 5.13 présentent les formes d'onde respectivement obtenues expérimentalement et par simulation.

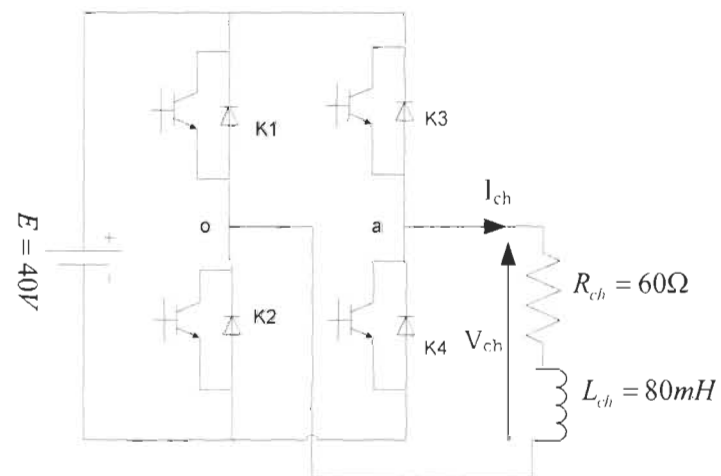


Figure 5.11: Schéma réalisé avec charge $R = 60\Omega$ et $L = 80mH$ pour le pont H

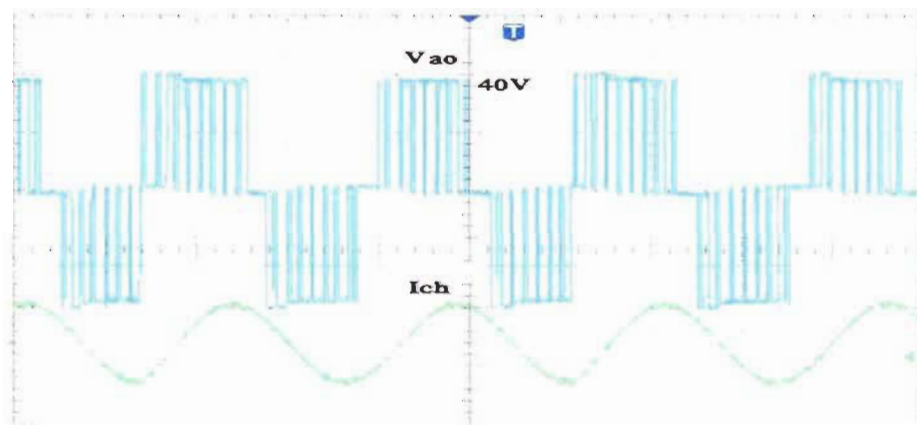


Figure 5.12 : Forme d'onde tension et courant de charge expérimentaux pour le pont H

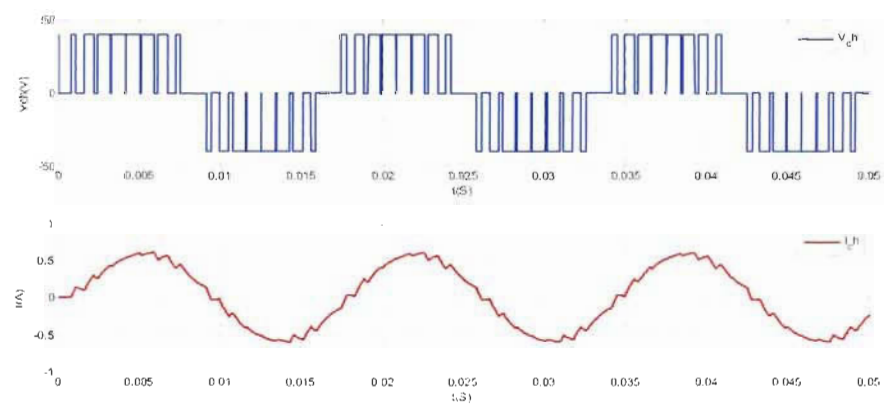


Figure 5.13 : Forme d'onde tension et courant de charge simulés pour le pont H

Commentaire : Les résultats expérimentaux et simulés sont identiques. L'ajout de l'inductance donne un courant de charge sinusoïdal légèrement bruité dû à la commutation. Notons aussi un déphasage entre la tension et le courant de charge.

b) Filtrage de la tension de sortie

Ajoutons un Filtre LC ($L = 5mH$ et $C = 4.7\mu F$) à la sortie de l'onduleur, et gardons la même tension d'entrée de l'onduleur $E = 40V$ et $R = 60\Omega$ comme charge, figure 5.14.

Nous répétons la même étude précédente. Les résultats de l'étude sont présentés dans les figures des pages suivantes.

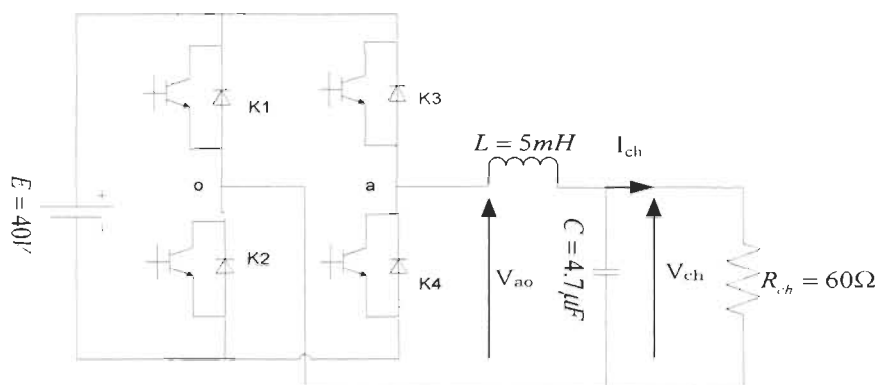


Figure 5.14 : Schéma réalisé avec charge $R = 60\Omega$ avec filtre pour le pont H

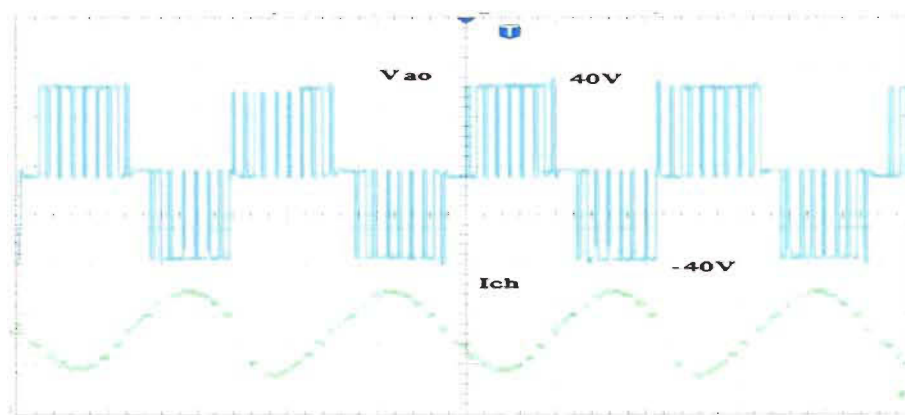


Figure 5.15 : Forme d'onde tension de sortie de l'onduleur et du courant de charge expérimentaux pour le pont H

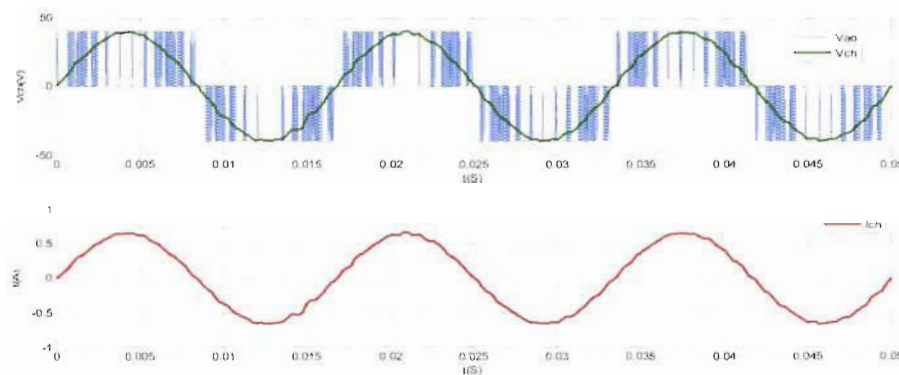


Figure 5.16 : Forme d'onde tension et courant de charge simulés pour le pont H

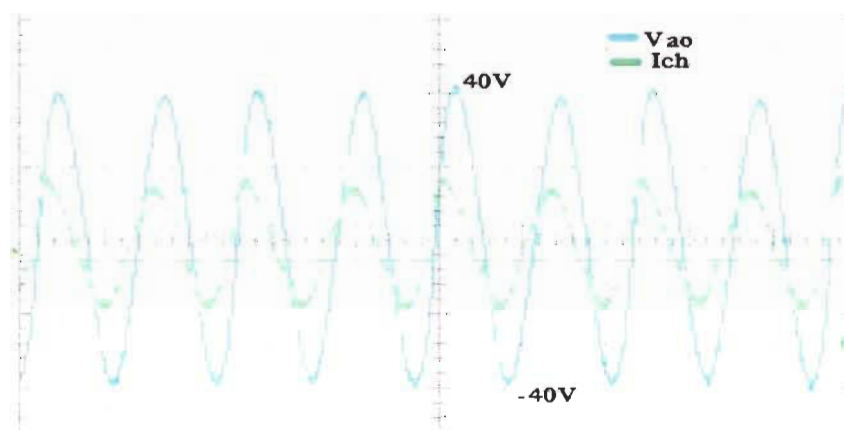


Figure 5.17 : Forme d'onde tension et courant de charge expérimentaux pour le pont H

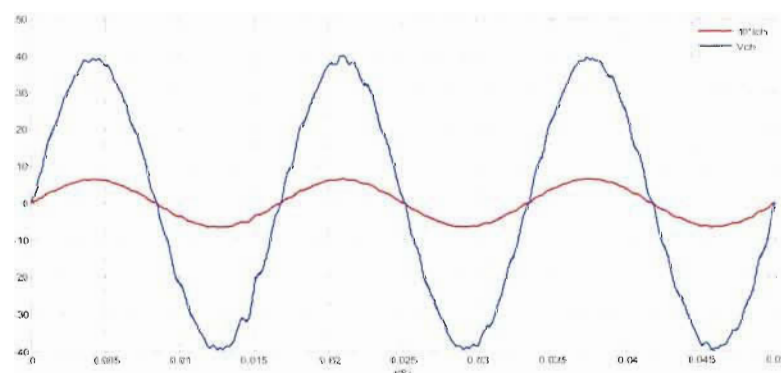


Figure 5.18 : Forme d'onde tension et courant de charge simulés pour le pont H

Commentaire : Nous remarquons que l'ajout d'un filtre L, C à la sortie de notre onduleur nous permet d'obtenir des tensions parfaitement sinusoïdales. Il faut ajouter à cela aussi la concordance des résultats obtenus en simulation et en pratique.

5.2 L'onduleur NPC monophasé à trois niveaux

Nous comptons obtenir en pratique la tension de sortie de l'onduleur trois niveaux NPC présenté à la figure 2.3.

L'onduleur utilisé est réalisé comme le montre la figure 5.19, cet onduleur comporte quatre interrupteurs commandés montés en série qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle; les autres composants de l'onduleur sont deux (2) diodes de maintiens, deux condensateurs partageant une tension continue en deux valeurs égales. Nous avons utilisé des IGBTs comme interrupteurs commandés, des diodes comme diodes de maintien et deux condensateurs de même capacité $C = 2000\mu F$.

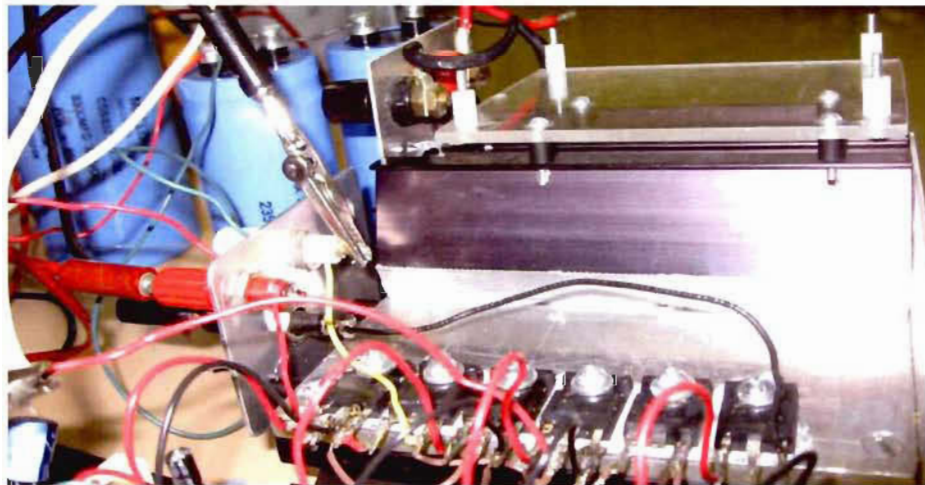


Figure 5.19 : Photo de l'onduleur NPC

Le principe de commande est le même que celui de l'onduleur cascadié en pont H. Les signaux de commande PWM montrés à la figure 5.20 proviennent aussi du Dspic. Ils sont les mêmes que ceux obtenus à la figure 5.3, pour le cas pont cascadié en H. La seule différence est l'ordre d'envoi des impulsions car les positions des interrupteurs changent

selon la topologie d'onduleur. Le signal PWM obtenu à la sortie du circuit FOD3181 varie de 0V-3.3V

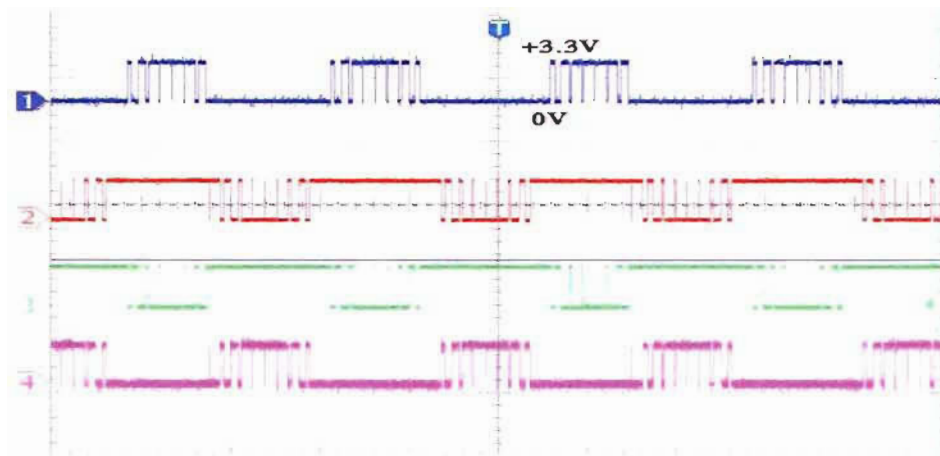


Figure 5.20 : Signaux PWM obtenus par le Dspic

Il est à noter que les grilles des interrupteurs commandés de cette topologie ont des masses flottantes et sont montées en série. Un autre problème est qu'il est nécessaire d'isoler la partie commande de la partie puissance. Donc un circuit de commande adapté est nécessaire pour l'envoi des signaux PWM au niveau de l'onduleur. Nous utiliserons l'interface électronique présentée à la figure 5.20 pour contourner ces problèmes. Cette interface électronique est composée de quatre optocoupleurs (FOD3181) alimentés chacun par son propre circuit d'alimentation (drive DCPO2). Un autre composant électronique utilisé dans cette interface est le SN75468, servant à amplifier le courant à la sortie du Dspic. Ce dernier circuit est important dans la mesure que chaque duo (drive-optocoupleur) demande un courant de l'ordre 100mA, alors que le Dspic utilisé nous en fournit qu'environ 4mA. Les autres composants utilisés dans l'interface sont des condensateurs et des résistances pour le câblage des différents circuits comme le montre la photo de la figure B 2. Le schéma global du câblage de cette interface électronique est présenté à la figure 5.21.

Le signal PWM obtenu à la sortie du circuit FOD3181 varie de 0V-15V comme le montre la figure 5.23.

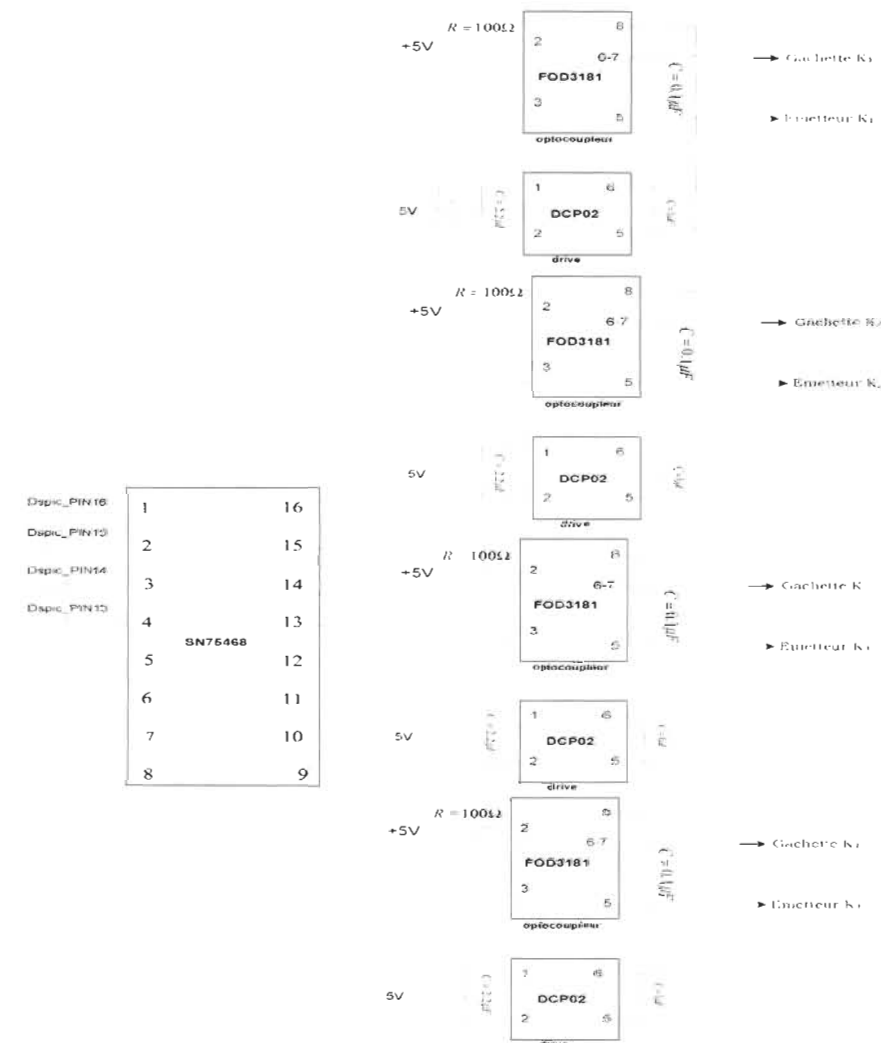


Figure 5.21 : Circuit de câblage de l'interface électronique pour le NPC

Chacun des quatre interrupteurs commandés constituant l'onduleur NPC reçoit son signal de commande provenant de son optocoupleur. Ainsi, la commande de chaque interrupteur se fait de manière indépendante, et a sa masse totalement isolée du reste du circuit.

Les autres composants nécessaires à cette validation expérimentale sont les sources de tension, les blocs de résistances comme charge, l'oscilloscope, l'inductance et le condensateur pour le filtre. Le schéma global du montage utilisé est présenté à la figure 5.22.

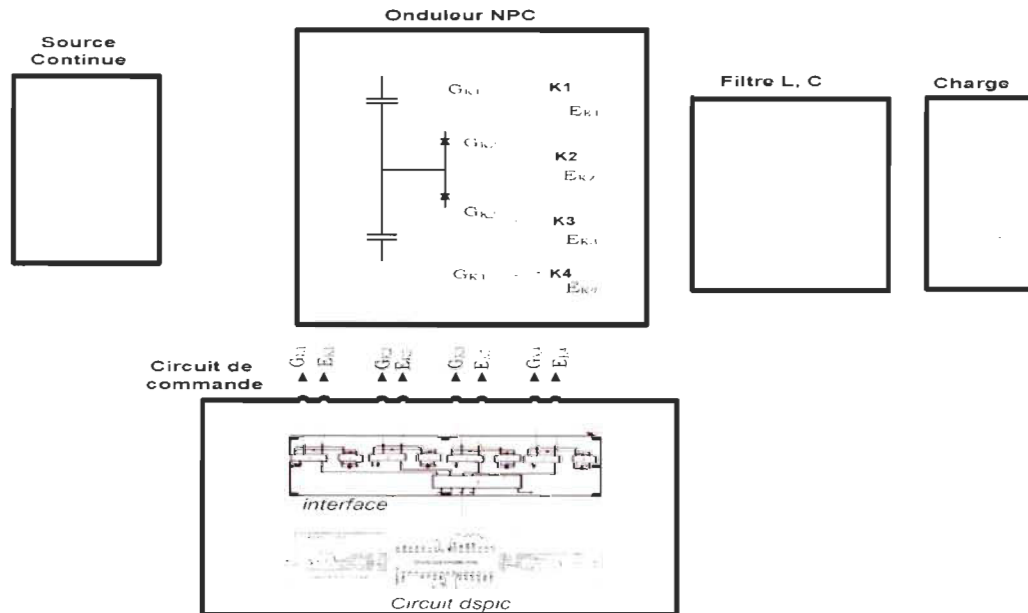


Figure 5.22: Système global pour la validation de l'onduleur NPC

La figure 5.23 nous montre les signaux PWM pour la commande de l'onduleur, ils sont obtenus à la sortie du circuit FOD3181.

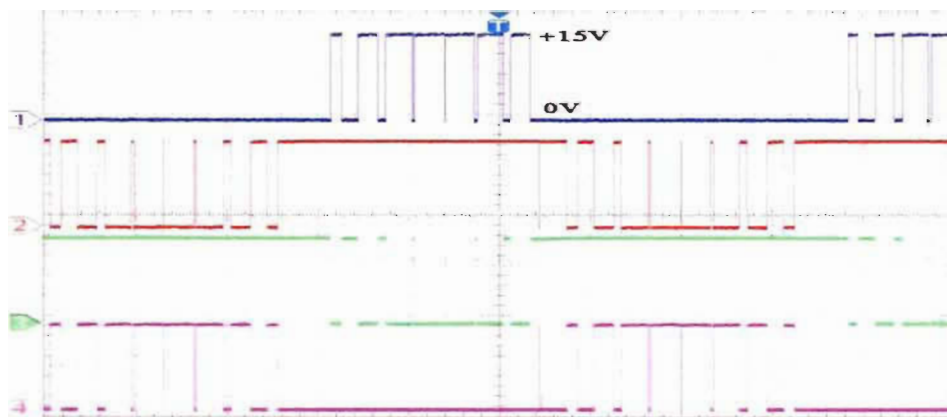


Figure 5.23 : Signaux PWM obtenus après amplification

5.2.1 Résultats expérimentaux pour l'onduleur NPC

Dans le but de s'assurer du fonctionnement de l'onduleur réalisé, nous commencerons nos validations par un essai à vide comme le montre le montage de la figure 5.24.

Pour une tension d'entrée $E = 15V$ et à vide, nous obtenons à l'oscilloscope la forme d'onde la figure 5.25, et dans les mêmes conditions en simulation, nous obtenons la forme d'onde de la figure 5.26.

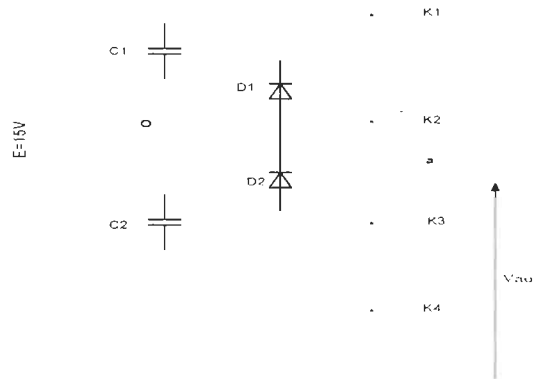


Figure 5.24 : Schéma réalisé du NPC à vide

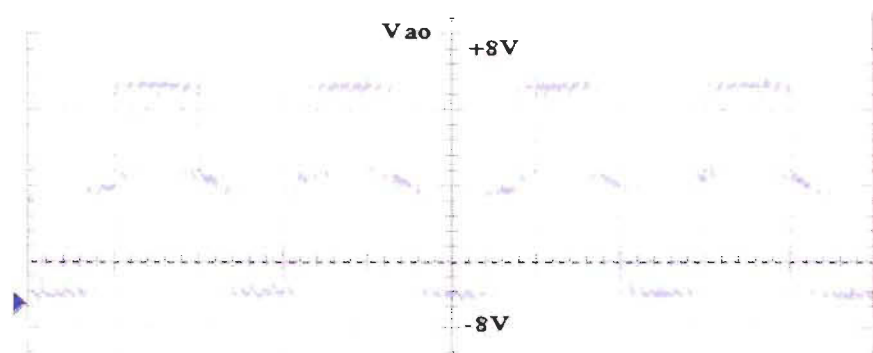


Figure 5.25 : Forme d'onde de la tension de sortie expérimentale à vide pour le NPC

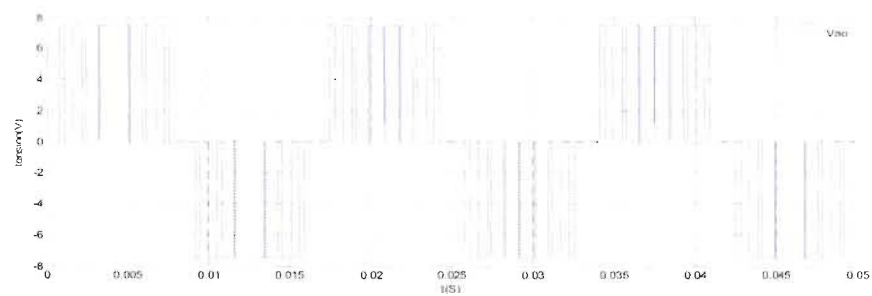


Figure 5.26 : Forme d'onde de la tension de sortie simulée à vide pour le NPC

Commentaire : Les formes d'onde obtenues de la tension V_{uo} à la sortie de l'onduleur expérimentalement correspondent à celles simulées mais aussi à celles présentées dans la partie théorique du chapitre 2. Le signal obtenu en simulation est meilleur (moins déformé) que celui obtenu expérimentalement, ce qui s'explique en partie par la non partage équitable de la tension d'entrée par les deux condensateurs placés en entrée de l'onduleur NPC. Ce problème est d'ailleurs soulevé dans la référence [9] et fait partie des inconvénients de la topologie NPC. D'un autre côté, les valeurs de nos condensateurs utilisés diffèrent légèrement ($C_1 = 2030\mu F$ et $C_2 = 2200\mu F$).

Pour la suite de la validation, nous utiliserons aussi ces deux valeurs de condensateur en simulation et la tension d'entrée continue est d'environ 12V.

a) Charge purement résistive :

La figure 5.27 montre le schéma réalisé en pratique et en simulation de l'onduleur multiniveaux de type NPC avec charge purement résistive.

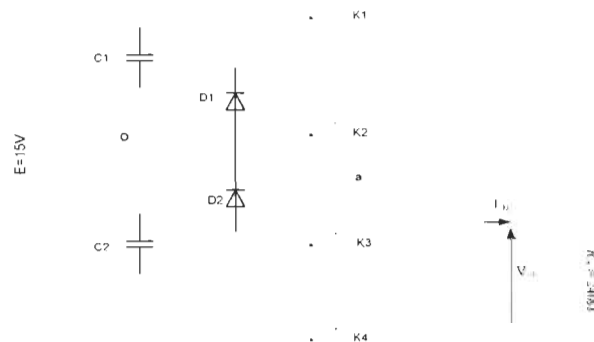


Figure 5.27 : Schéma réalisé du NPC avec charge $R = 240\Omega$

La figure 5.28 et la figure 5.29 présentent les formes d'onde respectivement obtenues expérimentalement et par simulation.

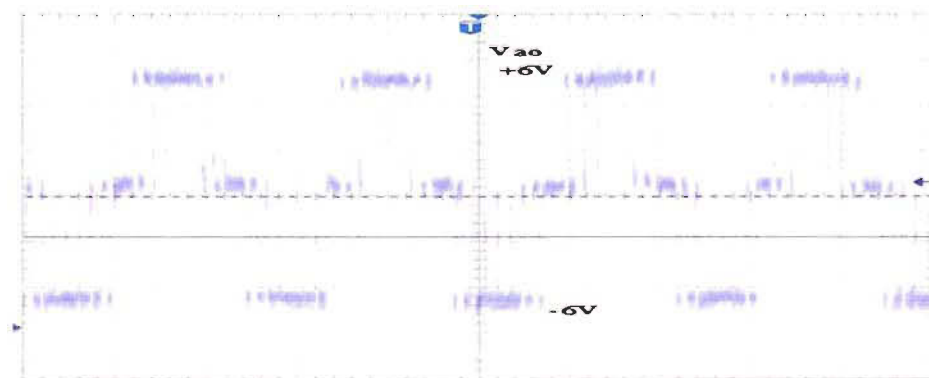


Figure 5.28 : Forme d'onde de la tension de charge expérimentale pour le NPC

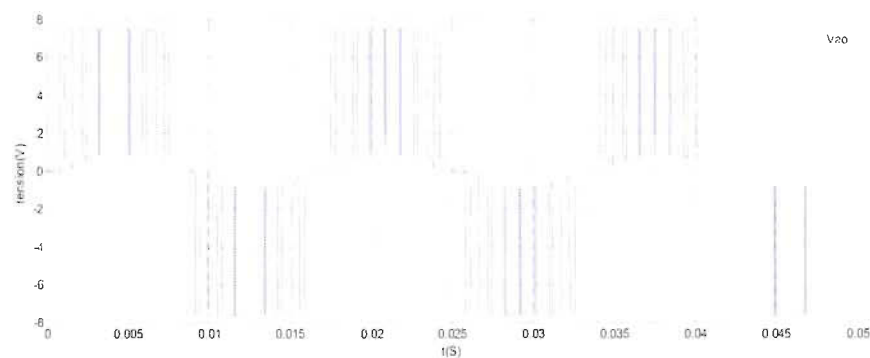


Figure 5.29 : Forme d'onde de la tension de charge simulée pour le NPC

Commentaire : Les formes d'onde obtenues expérimentalement correspondent à celles simulées mais aussi à celles présentées dans la partie théorique du chapitre 2. Nous remarquons aussi cette légère déformation du signal en simulation due en partie à l'inégalité des valeurs des condensateurs utilisés en entrée.

a) Filtrage de la tension de sortie

Ajoutons un Filtre LC ($L = 5mH$ et $C = 4.7\mu F$) à la sortie de l'onduleur, et gardons la même tension d'entrée de l'onduleur $E = 12V$ et $R = 240\Omega$ comme charge (figure 5.30).

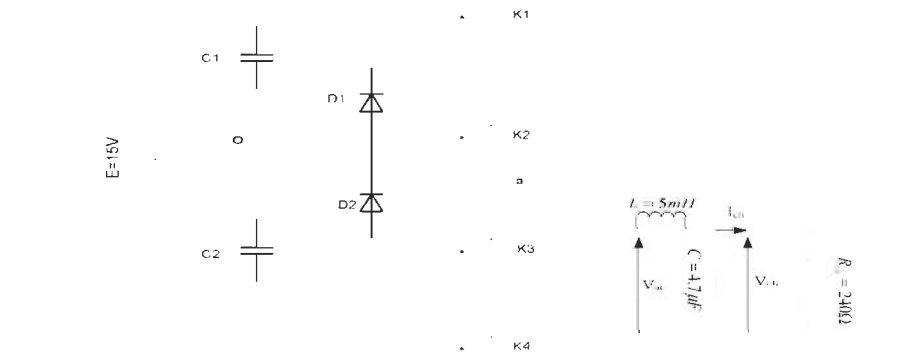


Figure 5.30 : Schéma réalisé du NPC avec charge $R = 240\Omega$ et avec filtre

La figure 5.31 et la figure 5.32 présentent les formes d'onde respectivement obtenues expérimentalement et par simulation.

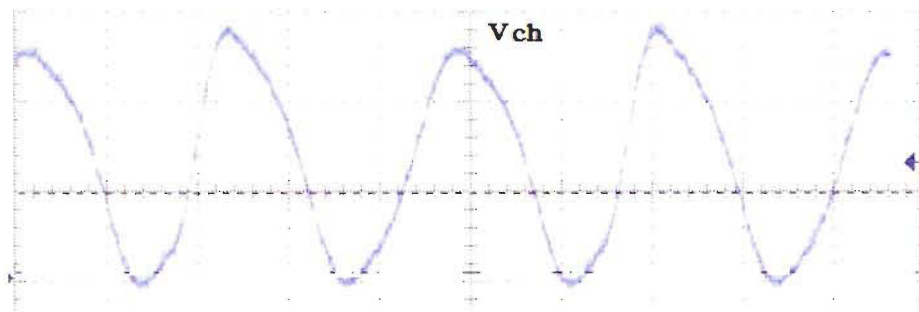


Figure 5.31 : Forme d'onde de la tension de charge expérimentale pour le NPC

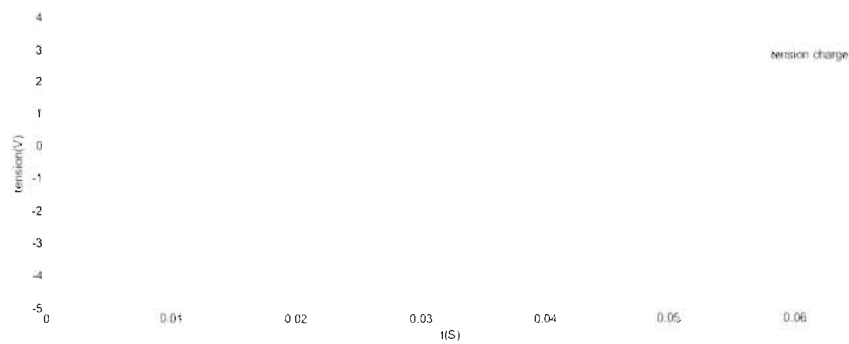


Figure 5.32 : Forme d'onde de la tension de charge simulée pour le NPC

Commentaire : Nous remarquons l'ajout d'un filtre L, C à la sortie de notre onduleur nous permet d'obtenir une tension sinusoïdale. Il faut ajouter à cela aussi la concordance des résultats obtenus en simulation et en pratique.

5.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons pu faire des validations expérimentales sur des bras de convertisseurs à trois niveaux de tension de type cascade en pont H et de type NPC. Nous avons réalisé non seulement le convertisseur NPC mais aussi nous avons pu tester notre commande sur des bras d'onduleurs de trois niveaux de types NPC et cascade en pont H. Ainsi, nous avons pu faire des comparaisons entre les résultats obtenus expérimentalement et en simulation. Les résultats sont concluants quand à la qualité des signaux obtenus, nous avons obtenus les mêmes formes d'onde pour les deux onduleurs malgré que l'onduleur cascade de type H utilisé est réalisé à l'industrie.

Pour ce cas pratique la réalisation expérimentale pour l'onduleur cascadié en pont à été plus simple. En effet, la difficulté d'avoir deux tensions égales en entrée du convertisseur NPC, la gestion des masses flottantes des IGBTs du NPC justifient cette affirmation. À cela il faudra ajouter la difficulté de monter en puissance pour ce cas NPC (environ 20V en entrée).

Mais pour le cas triphasé la réalisation de l'onduleur NPC à trois niveaux sera plus facile car on aura qu'une seule source continue à comparer à trois sources continues qui nécessiteront une isolation complète pour l'onduleur cascade en pont H. Ce qui s'explique aussi par la facilité de passer d'un bras d'onduleur NPC à l'onduleur triphasé NPC. Donc notre choix au chapitre 3 de l'onduleur NPC est bien justifié du point de vue facilité de réalisation, qualité des signaux.

Chapitre 6 - Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de recherche est de contribuer au développement de solutions pour améliorer la capacité des éoliennes à vitesse fixe à rester connectées au réseau malgré un défaut «Ride Through». Or, l'une des causes principales de déconnexion des éoliennes du réseau est la variation de la tension (creux ou survolage) au point de connexion commun (PCC) [1,4]. Donc, l'amélioration du «Ride Through» consiste à maintenir le plus que possible une tension constante au PCC. Nous remarquons aussi que les chutes de tension au PCC dépendent fortement de la contribution en puissance réactive du réseau. Ainsi, un contrôle adéquat de la puissance réactive permet de stabiliser la tension au PCC, soit en injectant ou en absorbant de la puissance réactive du réseau. Et plusieurs techniques sont utilisées, entre autre le compensateur statique STATCOM. Ainsi, dans ce projet nous avons étudié des structures d'onduleurs multiniveaux utilisées dans des applications de compensateur statique synchrone. Cette étude nous permettra de choisir entre la topologie d'onduleur multiniveaux NPC et celle cascadiée en pont H présentant les meilleures performances (compensation de puissance réactive, Ride Through, facilité de réalisation, etc.) pour fournir, à une charge ou à une éolienne à vitesse fixe connectée à un réseau local, les puissances active et réactive désirées pour le maintien d'une tension constante au PCC.

Nous avons commencé par une recherche bibliographique sur les structures de STATCOM. Ensuite nous avons présenté une analyse théorique et comparative, des modélisations et des simulations de structures de convertisseurs NPC et cascade en pont H de niveaux trois, cinq et N dans l'environnement Matlab/Simulink/SimpowerSystems. Ce qui nous a permis de conclure que le convertisseur le mieux adapté pour notre application est le NPC à trois niveaux.

Aussi, sont présentées des analyses de transfert de puissance, un algorithme de compensation de la puissance réactive par un STATCOM NPC pour une charge locale,

puis pour une éolienne à vitesse fixe. Les résultats de cette étude ont montré que la tension au PCC entre l'éolienne à vitesse fixe et le réseau fluctuait moins en présence d'un STATCOM, qu'à son absence.

Enfin, nous avons réalisé non seulement le convertisseur NPC mais aussi nous avons pu tester notre commande sur des bras d'onduleurs de trois niveaux de types NPC et cascade en pont H. Ainsi, nous avons pu faire des comparaisons entre les résultats obtenus expérimentalement et en simulation. Les résultats sont concluants quant à la qualité des signaux obtenus, nous avons obtenus les mêmes formes d'onde pour les deux onduleurs étudiés.

En bref, un parcours très enrichissant, comprenant l'étude théorique, la modélisation, la simulation, et la validation expérimentale, a permis de montrer l'intérêt d'utiliser les convertisseurs multiniveaux dans des applications de STATCOM. Ainsi, nous pouvons non seulement affirmer que les convertisseurs multiniveaux cumulent plusieurs avantages qui sont entre autres la capacité de générer une très bonne qualité de formes d'ondes, la fréquence de commutation réduite, les faibles pertes d'énergie et la diminution de l'effort sur les composants statiques mais aussi le STATCOM avec son apport en énergie réactive permet de stabiliser une tension à une valeur relativement constante et c'est malgré un défaut (chutes de tensions, court-circuit,...), ce qui évitera les déconnexions suite aux déclenchements d'équipements de protection des parcs éoliens, et permettra de maintenir les éoliennes connectées au réseau même sous certaines conditions de perturbation.

Pour les travaux futurs, il est nécessaire de finir la réalisation du convertisseur triphasé NPC à trois niveaux. Aussi, il est primordial de développer et trouver un moyen d'implémenter l'algorithme de commande en boucle fermée du convertisseur réalisé permettant de fournir au réseau électrique, de la puissance réactive nécessaire au maintien d'une tension constante au PCC, tout en permettant à l'éolienne de rester connectée au réseau durant un défaut (Ride Through). Ainsi, nous pourrions faire des essais expérimentaux en connectant le convertisseur (STATCOM) au banc d'essai pour éolien disponible déjà au laboratoire «Qualité de l'onde» de l'UQTR.

Références

- [1] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse «Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie», *J3eA Vol.5* hors serie I (2000), journée de la section Électrotechnique du club EEA.
- [2] L. Qi, J. Langston, M. Steurer, «Applying a STATCOM for Stability Improvement to an Existing Wind Farm with Fixed-Speed Induction Generators», *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, page(s): 1-6, 20-24 July 2008.
- [3] E. Muljadi, C.P. Butterfield, J. Conto, K. Donohoo, «Ride-Through Capability Predictions for Wind Power Plants in the ERCOT Network», *Power Engineering Society General Meeting*, 2005. IEEE, page(s): 72- 79 Vol.1, 2-16 June 2005.
- [4] Roohollah Fadaeinedjad, Gerry Moschopoulos, «Using STATCOM to Mitigate Voltage Fluctuations Due to Aerodynamic Aspects of Wind Turbines», *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008*, 15-19 June 2008 Page(s):3648 – 3654.
- [5] J. Dixon and J. Rodriguez, «Reactive Power Compensation Technologies: State-of the-Art Review», *Proceedings of The IEEE*, Vol. 93, No. 12, PP 2144-2164, December 2005.
- [6] E. F. Mogos, X. Guillaud, V. Rogez, « A voltage regulation system for pitch-controlled variable-speed wind turbine », *Proceedings of the 21th International Conference on Securing Critical Infrastructures*, CRIS 2004, Grenoble, 25- 27 octobre 2004.

- [7] K. Smedley and T. Jin, «One-cycle control and its applications in power quality control and renewable power generation», Submitted for presentation at *IEEE PES General Meeting* 2005.
- [8] H.-H. Kuo, S.-N. Yeh and J.-C. Hwang, «Novel analytical model for design and implementation of three-phase active power filter controller» *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 148, No. 4, pp 385-390, July 2001.
- [9] Ying Cheng, Chang Qian, Mariesa L. Crow, Steve Pekarek, «A Comparison of Diode-Clamped and Cascaded Multilevel Converters for a STATCOM With Energy Storage» *Industrial Electronics*, IEEE Transactions on Volume 53, Issue 5, Oct. 2006 Page(s):1512 – 1521.
- [10] Joseph SONG MANGUELLE, *Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence : réactions au réseau d'alimentation*, Thèse n° 3033 (2004), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.
- [11] Jean-Sébastien MARIÉTHOZ, *Étude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques : topologies, modulation et commande*, Thèse n° 3188 (2005), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.
- [12] Wu Hongyang; He Xiangning; «Power Electronics and Motion Control Conference, 200. Proceedings ». *IPEMC 2000. The Third International Volume 3*, 15-18 Aug. 2000 Page(s):1099 - 1103 vol.3 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2000.882983.
- [13] A.Radana, A.H.Shahirinia «Novel Carrier-Based PWM Methods for Multi-level Inverters» *EPE Journal*, ISSN 0939-8368 Vol.18-N°2- April-May-June 2008 pages16-21.
- [14] P. Bhagwat, V. R. Stefanovic, «Generalized structure of a multilevel PWM inverter», *IEEE-IAS'80*, Conf. Proc. pp. 791-803, 1980.

- [15] W. E. Brumsickle, D. M. Divan, T. A. Lipo, «Reduced switching stress in high-voltage IGBT inverters via a three-level structure», *APEC'98, 30th annual meeting*, Applied Pow. Elect. Conf. and Exp. vol.2, pp.544-550, 1998.
- [16] M. L. Doumbia and K. Agbossou «Power transfer analysis in interconnected fuel cell-distribution network» *CCECI*, Saskatoon, 2005.
- [17] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, «Understandings FACTS: Concepts and Technology of flexible ac transmission systems» New York: *IEEE Press*, 2000.
- [18] M. Dai, M.N. Marwali, J.W. Jung and A. Keyhani, «Power flow control of a single distributed generation unit with nonlinear local load» *Power Systems Conference and Exposition PES*, Vol. 1, PP 398-403, 10-13 October 2004.

a) Organigramme du code utilisé

La figure A.1 montre l'organigramme utilisé pour la génération des signaux de commande.

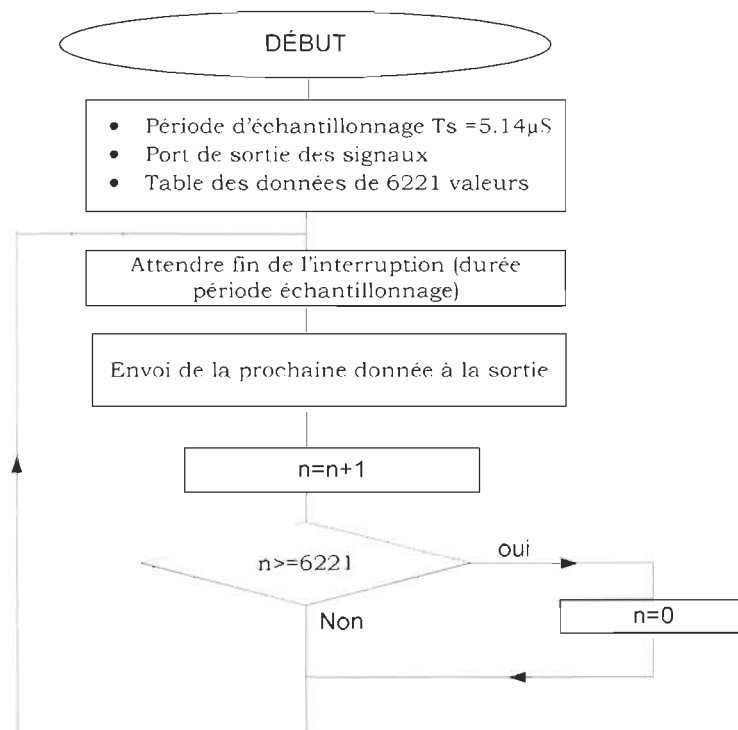


Figure A.1 Organigramme du code utilisé

La figure A.2 nous montre l'interface du Dspic dans le logiciel MPLAB.V8.36 où nous pouvons changer les paramètres , la configuration du Dspic pour la génération des signaux de commandes PWM.

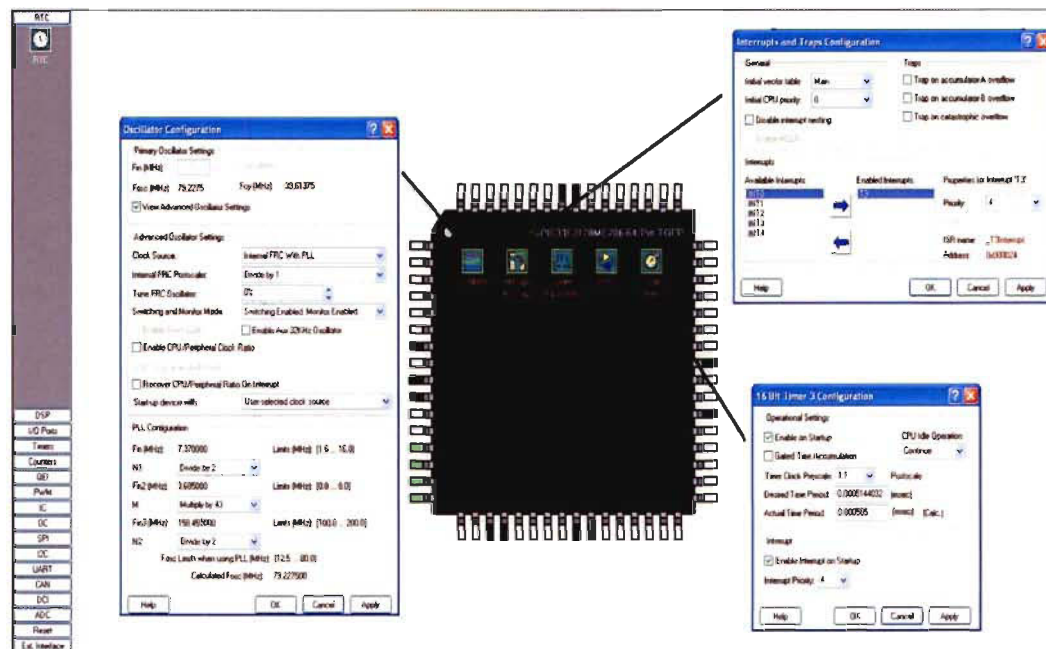


Figure A.2 Circuit du Dspic dans MPLAB

b) Code utilisé

```
#include "p33FJ128MC706.h"
#include "seq.h"

void __attribute__((__interrupt__)) _T3Interrupt(void)
{
    int n;
    _T3IF=0;
    PORTB=seq[n++];
    if (n>6221) n=0;
}

main()
{
    VisualInitialization();
    while(1);
}
}
```

2. Schéma de câblage du Dspic

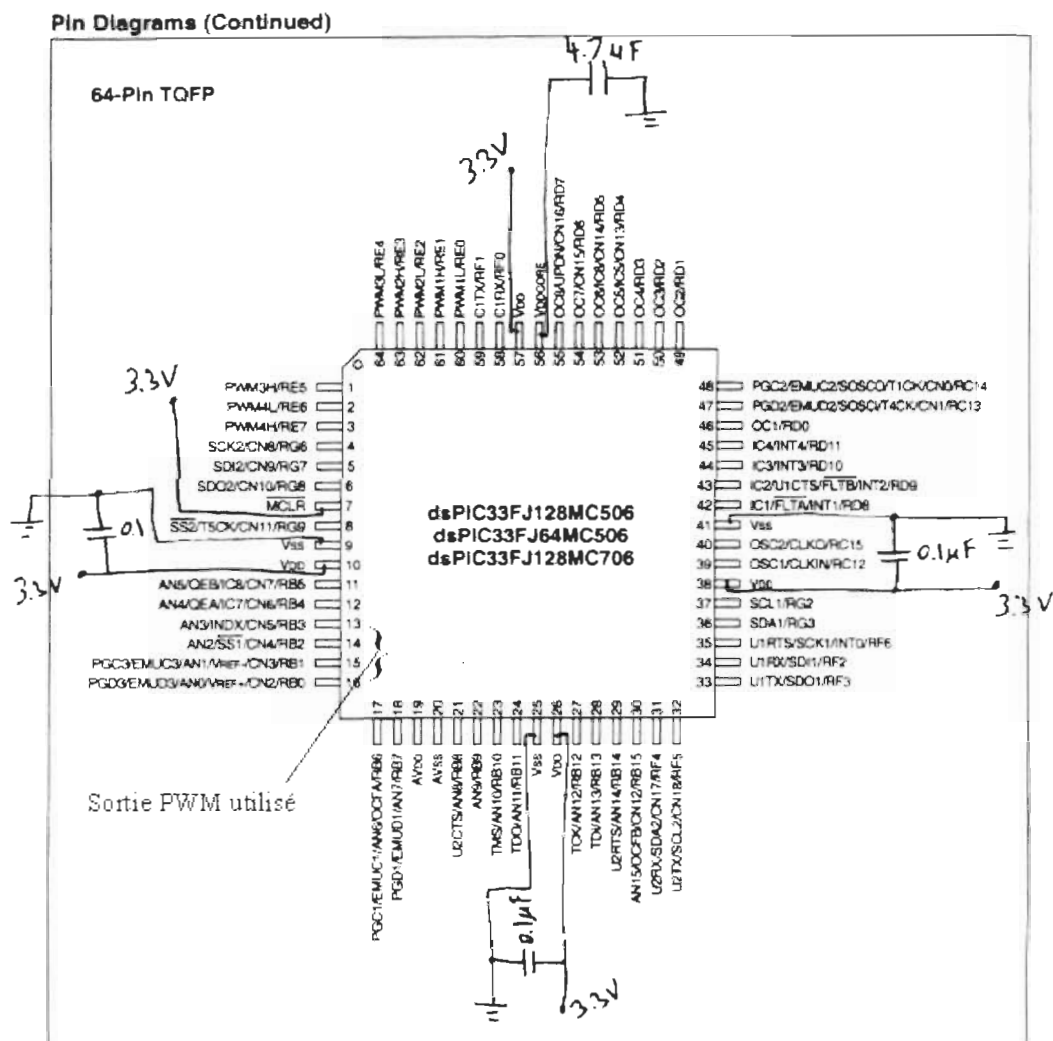


Figure A.3 Circuit de câblage du dsPic

Annexe B - Photos des montages réalisés en laboratoire

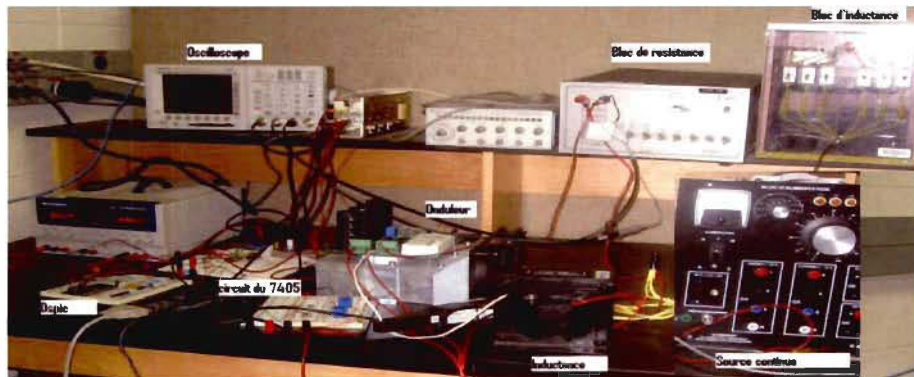


Figure B.1 Système global pour la validation de l'onduleur cascade en pont H

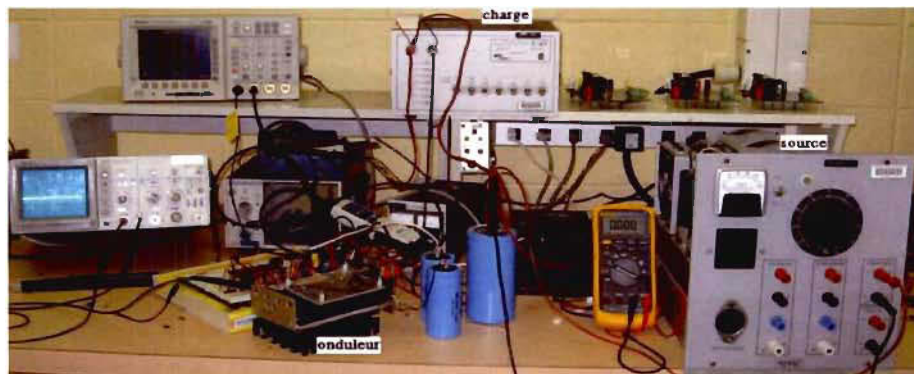


Figure B.2 Système global pour la validation de l'onduleur NPC

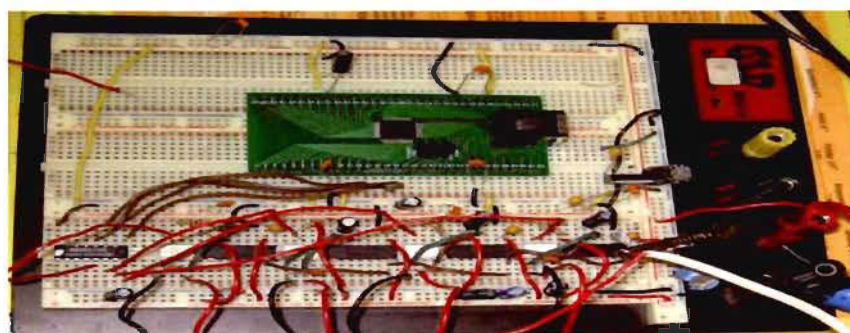


Figure B.3 : Photo de l'interface circuit de commande pour le NPC